

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

# **Vliv technologie svařování na vlastnosti a mikrostrukturu svarového spoje na výrobku zhotoveném metodou SLM**

## **The Influence of Welding Technology on Properties and Microstructure of the Weld Joint on the SLM Product**

Student:

Bc. Jakub Hruban

Osobní číslo

HRU0165

Vedoucí práce:

doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Hruban**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Vliv technologie svařování na vlastnosti a mikrostrukturu svarového spoje na výrobku zhotoveném metodou SLM**  
**The Influence of Welding Technology on Properties and Microstructure of the Weld Joint on the SLM Product**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii na téma 3D tisku kovů se zaměřením na metodu Selective Laser Melting (SLM).
2. Popište použitou technologii svařování.
3. Navrhněte pWPS pro zkušební svarové spoje.
4. Zhotovte zkušební svarové spoje.
5. Na zhotovených vzorcích proveďte destruktivní a nedestruktivní zkoušky.
6. Vyhodnoťte dosažené výsledky a vyslovte závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2010, 459 s. ISBN 978-1-4419-1119-3  
SAMES, W. J., F. A. LIST, S. PANNALA, R. R. DEHOFF a S. S. BABU. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*. [online]. 2016, 61(5), 315-360 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649. ISSN 0950-6608. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09506608.2015.1116649>  
KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I.* skriptu VŠB – TUO. Ostrava: VŠB – TUO, 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

**Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020



**Podpis studenta**

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou\*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užit tuto závěrečnou bakalářskou\*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- буде-ли по́радовано, jeden výtisk této bakalářské\*) práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užit dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užit toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská\*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



---

Podpis studenta

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

HRUBAN, J. *Vliv technologie svařování na vlastnosti a mikrostrukturu svarového spoje na výrobku zhotoveném metodou SLM*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2020, 76 stran, vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá vlivem technologie svařování na vlastnosti a mikrostrukturu svarového spoje na výrobku z korozivzdorné oceli 316L zhotoveném pomocí 3D tisku metodou SLM. Teoretická část práce je věnována zvoleným technologiím použitých při výrobě vzorků a zkoušek, které na nich byly aplikovány. Praktická část je zaměřena na přípravu vzorků a následné provedení a zhodnocení zkoušek. Z nedestruktivních zkoušek byla provedena zkouška vizuální, kapilární a zkouška prozářením. Mezi destruktivní zkoušky, které byly provedeny patří mikroskopická a makroskopická zkouška, měření tvrdosti a v poslední řadě zkouška tahem. Veškeré poznatky jsou pak shrnuty v závěru.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

HRUBAN, J. *The Influence of Welding Technology on Properties and Microstructure of the Weld Joint on the SLM Product*: Master Thesis. Ostrava: Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2020, 76 p, Supervisor: doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D

The Master thesis deals with the effect of welding technology on the properties and microstructure of a welded joint on a 316L corrosion resistant steel made by 3D printing using the SLM method. The theoretical part of the Master thesis is decided to selected technologies used in the production of the samples and the tests that have been applied to them. The practical part is focused on the preparation of samples and subsequent implementation and evaluation of tests. From non-destructive tests, visual, penetrant and radiographic tests were performed. The destructive tests that were performed included microscopic and macroscopic analysis, hardness measurement and, last but not least, tensile testing. All findings are then summarized in the conclusion.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	8
Úvod .....	9
<b>1 Aditivní technologie.....</b>	<b>10</b>
1.1 3D tisk kovových materiálů .....	11
<b>2 Technologie 3D tisku SLM (Selective Laser Melting).....</b>	<b>12</b>
2.1 Výrobní proces .....	12
2.2 Post-processing .....	13
2.3 Problémy u 3D technologie SLM.....	14
<b>3 Svařování metodou 141 (TIG/WIG) .....</b>	<b>18</b>
3.1 Zdroje svařovacího proudu TIG svařování .....	19
3.2 Wolframové elektrody .....	21
3.3 Ochranné plyny (atmosféry).....	26
3.4 Výhody a nevýhody svařování metodou 141 (TIG/WIG) .....	27
<b>4 Kvalifikace svarových spojů dle normy ČSN EN ISO 15614-1 .....</b>	<b>28</b>
4.1 Zkušební kus .....	28
4.2 Svařování zkušebních kusů .....	30
4.3 Kontrola a zkoušení zkušebních vzorků .....	30
<b>5 Nedestruktivní zkoušky .....</b>	<b>31</b>
5.1 Vizuální metoda .....	31
5.2 Penetrační (kapilární) metoda .....	32
<b>6 Destruktivní zkoušky .....</b>	<b>33</b>
6.1 Příčná zkouška tahem.....	33
6.3 Zkoušení tvrdosti.....	34
6.4 Makroskopická kontrola .....	35
<b>7 Praktická část.....</b>	<b>36</b>
7.1 Chemické a mechanické vlastnosti materiálu 316L .....	37
7.2 Měření hustoty .....	38
7.3 Zařízení pro výrobu vzorků .....	40

7.4	Svařovací zdroj .....	41
7.5	Tepelné zpracování .....	41
<b>8</b>	<b>Návrh pWPS.....</b>	<b>42</b>
<b>9</b>	<b>Svařování vzorků .....</b>	<b>44</b>
9.1	Pomůcky pro svařování .....	47
<b>10</b>	<b>Zkoušení svarových spojů.....</b>	<b>48</b>
10.1	Vizuální zkouška .....	48
10.2	Kapilární zkouška.....	49
10.3	Zkouška prozářením .....	50
10.4	Měření tvrdosti .....	50
10.5	Tahová zkouška .....	52
10.6	Makrostruktura a mikrostruktura svarového spoje.....	55
10.6.1	Příprava metalografických vzorků.....	56
10.6.2	Makrostruktura svarového spoje.....	58
10.6.3	Mikrostruktura vzorku bez tepelného zpracování (3D1) .....	60
10.6.4	Mikrostruktura vzorku s tepelným zpracováním (3D3) .....	63
	Závěr.....	66
	Citovaná literatura .....	70
	Seznam obrázků.....	73
	Seznam tabulek.....	75
	Seznam příloh .....	76

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Značení	vysvětlení	Jednotky
3D	prostorové třírozměrné rozhraní	[-]
A5	tažnost	[%]
AC	střídavý proud	[-]
CAD	počítačem podporované projektování	[-]
DC	stejnoseměrný proud	[-]
F	síla	[N]
HV	tvrdost dle Vickerse	[-]
I	intenzita svařovacího proudu	[A]
k	tepelná účinnost	[-]
PA	vodorovná poloha při svařování	[-]
pWPS	předběžná specifikace postupu svařování	[-]
Q	množství vneseného tepla na jednotku délky	[KJ · mm <sup>-1</sup> ]
Rm	mez pevnosti v tahu	[MPa]
Rp0,2	smluvní mez kluzu	[MPa]
SLM	selektivní laserové tavení	[-]
SLS	selektivní laserové spékání	[-]
t	svařovací čas	[s]
TIG	svařovací metoda netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu	[-]
TOO	teplem ovlivněná oblast	[-]
TZ	tepelné zpracování	[-]
U	napětí při svařování	[V]
v	rychlost svařování	[mm · s <sup>-1</sup> ]
Z	kontrakce	[%]



## Úvod

Aditivní výroba je moderní technologie, která se v posledních letech čím dál více rozvíjí. Jedním z takových příkladů je 3D tisk, který je založen na postupném přidávání vrstvy po vrstvě, dokud není dosaženo hotového výrobku. Pomocí technologie 3D tisku lze tedy rychle vyrábět plně funkční a tvarově komplexní díly, které jsou mnohdy jinými konvenčními technologiemi nevyrobitelné. Tato metoda byla z počátku hlavně spojována s výrobou plastových prototypů. Dnes je možné této výrobní technologii využít také pro zhotovení výrobků z kovového materiálu.

Jednou z nejvýznamnějších metod aditivní výroby kovů je technologie SLM (Selective Laser Melting). Používá se jak pro rychlé prototypování, tak pro hromadnou výrobu. Finální výrobek zhotovený touto metodou má vlastnosti rovnocenné vlastnostem vyrobeným tradičními výrobními postupy. Selektivní laserové tavení je vysoce energetický proces, protože každá vrstva kovového prášku musí být zahřívána nad bodem tání kovu. U této technologie tedy dochází k úplnému roztavení kovového materiálu. Výtisk tak není tvořen jednotlivými částicemi spečenými dohromady, ale díky tavení vzniká homogenní výrobek s lepšími fyzikálními vlastnostmi. Na druhou stranu produkty mají pórovitou strukturu, díky čemuž mají horší mechanické vlastnosti. Na tento aspekt musíme nahlížet při zatěžování, svařování a dalším namáhání.

V současné době lze selektivní laserové tavení používat pouze s určitými kovy. Mezi hojně využívaný materiál patří ocel 316L, a to zejména pro své mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi. Tato ocel se využívá v lékařství v potravinářském a chemickém průmyslu, nebo také v jaderné energetice. Materiál 316L je navíc ekonomicky a technologicky snadněji zpracovatelný, než např. materiály na bázi titanu. Díky postupnému a výraznému snižování nákladů v oblasti 3D tisku se tato metoda začíná jevit jako možná výrobní alternativa. Je proto velmi důležité zjistit, jak tento výrobní proces ovlivňuje mikrostrukturu oceli 316L a její odezvu na mechanické zatěžování. Právě tato práce se zaměřuje na onu problematiku.

Cílem této práce je posoudit vliv technologie svařování na mikrostrukturu a vlastnosti svarového spoje na výrobku z oceli 316L zhotoveného 3D tiskem metodou SLM. Pro svařování je v této práci použita metoda TIG bez přídavného materiálu. Důležitým faktorem, který hraje roli při porovnávání výsledných vlastností, je tepelné zpracování vzorků. Na zhotovených svarových spojích jsou provedeny nedestruktivní a destruktivní zkoušky dle příslušných norem.

# 1 Aditivní technologie

Aditivní výrobu (technologii) lze definovat jako proces spojování materiálu, kterým jsou vytvářeny prostorové předměty, většinou postupným přidáváním materiálu po jednotlivých vrstvách z 3D datových modelů, kde na rozdíl od konvenčních technologií nedochází k úběru materiálu, nebo přetvoření již stávající geometrie. Aditivní technologie jsou využívány jak při výrobě prototypů – „Rapid Prototyping“, tak funkčních součástí. V současnosti se aditivní výroba používá pro různé aplikace ve strojírenském průmyslu i v dalších oblastech společnosti, jako je lékařství, vzdělávání, architektura, kartografie, hračky a zábava.

Aditivní výrobu popisuje norma ISO/ASTM 52900:2015 (Additive Manufacturing – General Principles – Terminology), která ji rozděluje do 7 současných výrobních procesů [1]:

- **Vytlačování materiálu** (Material Extrusion) – materiál je selektivně vytlačován přes trysku nebo distribučním otvorem; metoda se používá převážně pro tisk termoplastů.
- **Nanášení tryskáním** (Material Jetting) – kapičky materiálu jsou selektivně ukládány; tisknout lze polymery a vosky.
- **Tryskání pojiva** (Binder Jetting) – tekuté pojivo je vrstvu po vrstvě nanášeno za účelem spojení práškových materiálů; tisknout lze kovy, písek nebo keramiku.
- **Laminace plátů** (Sheet Lamination) – pláty materiálu jsou spojovány a jako celek vytvářejí model.
- **Fotopolymerace** (Vat Photo-polymerization) – fotopolymerní kapalina v nádobě je vrstvu po vrstvě vytvrzována polymeračním světlem; zdrojovým materiálem pro vytvrzování je pryskyřice.
- **Spékání práškové vrstvy** (Powder Bed Fusion) – přivedená tepelná energie (laserový nebo elektronový paprsek) spéká práškový kov vrstvu po vrstvě; taví se oceli, hliníkové a titanové slitiny, kobalt-chromové slitiny, exotické materiály atd.
- **Přímé energetické nanášení** (Directed Energy Deposition) – materiál je nataven soustředěnou tepelnou energií i při změně polohy [1].

## 1.1 3D tisk kovových materiálů

3D tisk kovů je laserová technologie využívající kovy ve formě prášku. Tato technologie spojuje flexibilitu výroby 3D tiskem s mechanickými vlastnostmi kovu. Obecně je aditivní způsob výroby kovových dílů založen na principu nanesení tenké vrstvy už zmíněného kovového prášku (obvykle mezi 20  $\mu\text{m}$  až 100  $\mu\text{m}$ ) nanášecím pravítkem – recoterem na stavěcí platformu, na níž je prášek vystaven energetickému paprsku, nejčastěji laserovému, který jej speče do tvaru průřezu výrobku vygenerovaného z 3D modelu vždy pro konkrétní vrstvu. Zbylý kovový prášek zůstává nespečen. Dalším krokem je posunutí platformy o přírůstek tloušťky vrstvy dolů a nanesení nové vrstvy prášku. Tento postup se opakuje až do vystavění a spečení celé součásti. U složitějších objektů jsou podpůrné struktury generovány automaticky a budovány současně ze stejného materiálu a později jsou manuálně odstraněny. Po dokončení díl prochází tepelným zpracováním za účelem odstranění vnitřního pnutí. Takto aditivně postavené těleso obklopuje po spečení neexponovaný kovový prášek. Ten se recykluje a použije pro budoucí tisk [2, 3].

Materiál, který je možno použít u 3D tisku, bude hrát významnou roli v určování toho, jak a kde bude tento proces využíván. V dnešní době existuje široká škála těchto materiálů, které se vyskytují v různých formách, jako jsou prášky, vlákna, pelety, granule, pryskyřice atd. V této kapitole si však uvedeme materiály pouze pro 3D tisk kovů, jedná se např. o tyto materiály:

- Titan ( $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ )
- Hliník ( $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ )
- Inconel (IN718)
- Nerezová ocel (SS316L) - známá také jako 1.4404, je slitina nerezové oceli s nízkým obsahem uhlíku, která je vysoce odolná vůči korozi a nabízí vynikající pevnost. Vytiskovaná nerezová ocel má vysokou tvárnost a dobré tepelné vlastnosti. Nerezovou ocel lze použít v potravinářství, na díly strojů a výrobní nástroje. Další aplikace zahrnují potrubí, odolné prototypy, náhradní díly, lékařské nástroje a protetika [3].

U těchto technologií je řada významných omezení, jako je velikost vyráběných produktů, která je dána velikostí 3D tiskáren. Další nevýhodou při použití některých aditivních technologií je také nedokonalost povrchu surových tištěných výrobků, kde jsou vidět jednotlivé vrstvy tisku. Takový výrobek vyžaduje ve většině případů další opracování.

## 2 Technologie 3D tisku SLM (Selective Laser Melting)

SLM je jednou z nejzajímavějších technologií 3D tisku, která je dnes k dispozici, a používá se jak pro rychlé prototypování, tak pro hromadnou výrobu. Rozsah dostupných slitin kovů je v současnosti celkem omezený. Konečný výsledek má vlastnosti rovnocenné vlastnostem vyrobeným tradičními výrobními postupy. Proto je možné výtisky použít jako funkční finální výrobky. V současné době lze selektivní laserové tavení používat pouze s určitými kovy. Tato technika může být použita pro aditivní výrobu nerezové oceli, nástrojové oceli, titanu, kobaltu a hliníkových dílů. Selektivní laserové tavení je velmi energetický proces, protože každá vrstva kovového prášku musí být zahřívána nad bodem tání kovu. Vysoké teplotní gradienty, ke kterým dochází během výroby SLM, mohou také vést k napětím a deformacím uvnitř finálního produktu, což může ohrozit jeho fyzikální vlastnosti. Technologie je v principu velmi podobná metodě SLS. Zde ale nedochází ke spékání ale k úplnému roztavení kovového materiálu. Výtisk tedy není tvořen jednotlivými částicemi spečenými dohromady, ale díky tavení vzniká homogenní výrobek s lepšími fyzikálními vlastnostmi [4, 5, 6].

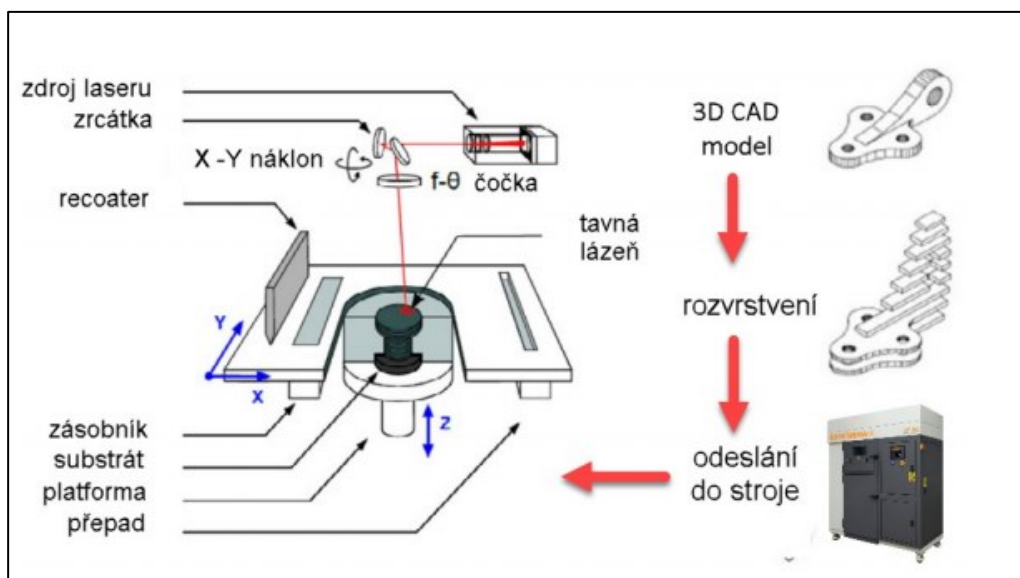
### 2.1 Výrobní proces

Model výrobku připravený v 3D pomocí systému CAD je nejprve „rozřezán“ na jednotlivé vrstvy, díl je pak „stavěn“ vrstvu po vrstvě. Energie laserového paprsku lokálně taví kovový prášek pouze v konturách řezu, který je definován průnikem dané roviny (vrstvy) tělesem (3D CAD modelem) výrobku. V průběhu stavby dílu je nezbytná fixace správné polohy dílu pomocí podpůrné struktury, která je ukotvena k základní ocelové platformě. Podpůrné prvky jsou stavěny vrstvu po vrstvě zároveň s výrobkem. Minimální tloušťka vrstvy je 20 mikrometrů [10].

K procesu tavení dochází v přísně regulované atmosféře. Pracovní komora je před zahájením procesu zbavena vzduchu a vlhkosti (prostor tvoří téměř stoprocentní vakuum). Následně je vyplněna inertním plynem argonem, alternativně dusíkem. Díky inertní atmosféře je možné pracovat s reaktivními kovovými prášky, jako jsou hliníkové a titanové slitiny [1].

Po přípravné fázi a kalibraci desky před 3D tiskem je do zásobníku nasypán kovový prášek, který je na platformu rovnoměrně nanášen planžetou se silikonovou lištou. V další části výrobního procesu dochází k tavení vrstvy práškového kovu laserem podle předem připraveného programu. Výška vrstvy souvisí s nastavením parametrů a použitého kovového prášku. Pro korozivzdornou ocel se standardně uvádí výška vrstvy 50

mikrometrů. Laserový paprsek je směřován v osách X a Y dvěma vysokofrekvenčními snímacími zrcátky. Laserová energie je dostatečně silná, aby umožnila úplné roztavení kovových částic. V případě zařízení Renishaw AM 400, které je použito při výrobě vzorků k této diplomové práci, je výkon laseru 400 W. Po dokončení každé vrstvy se platforma posune níže v ose Z – přesně o výšku další vrstvy – a celý proces se opakuje do doby, než je dokončena stavba celého modelu. Po dokončení stavby se nepoužitý prášek, který se v průběhu procesu nenatavil a obklopuje již zhotovený produkt, smete do otvoru, odkud putuje do nádob pro manipulaci s práškem umístěné ve spodní části stroje. Kovový prášek je následně zpracován v prosévacím zařízení pro další použití. Po odstranění stavby z platformy následují další navazující technologické procesy s ohledem na kvalitu a výrobní přesnost [1].



Obrázek 2.1 – Schéma technologie SLM [33]

## 2.2 Post-processing

Po dokončení výroby je součást je očištěna od zbylého prášku. Běžně se prášek vyfoukává stlačeným vzduchem, je možno ovšem použít i ultrazvukové čištění nebo suchý led. Následně jsou prováděny dokončovací operace za účelem zlepšení mechanických vlastností a finálního vzhledu součástí. Pro technologii SLM jsou nejčastěji používány tyto dokončovací operace [7]:

- **Tryskání abrazivními částicemi** (šterk, keramika) – omílání proudem abrazivních částic. Abrazivní systémy patří mezi standardní doplňky SLM zařízení.
- **Kuličkování** (ocel, keramika, sklo) – omílání sférickými částicemi, které jsou uvedeny do pohybu pneumaticky či mechanicky. Nárazem kuličky je povrch zbaven zbytkového napětí a je zvýšena korozní a únavová odolnost.

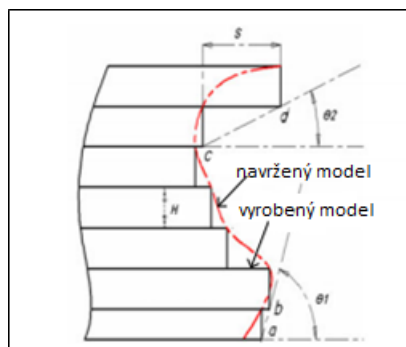
- **Leštění** – finální úprava povrchu. Pokud je na součást kladen důraz na rozměrovou přesnost používá se řízené omílání jemnými částicemi nebo elektrochemické leštění. U vzhledových dílů se používá ekonomicky výhodnější ruční leštění.
- **Galvanické pokovení** – pokrytí tenkou kovovou vrstvou.
- **Elektronový svazek** – vyhlazení povrchu pomocí ozáření rozostřeným svazkem elektronového děla.
- **Tepelné zpracování** – žíhání na různých teplotách po určitou dobu za účelem nížení vnitřního pnutí, což výrazně zlepší mechanické vlastnosti [7].

## 2.3 Problémy u 3D technologie SLM

I přes značný technologický rozvoj a pokrok této technologie v posledních letech existuje celá řada omezení, které mají vliv jak při výrobě součásti, tak na následné použití.

### Kvalita povrchu

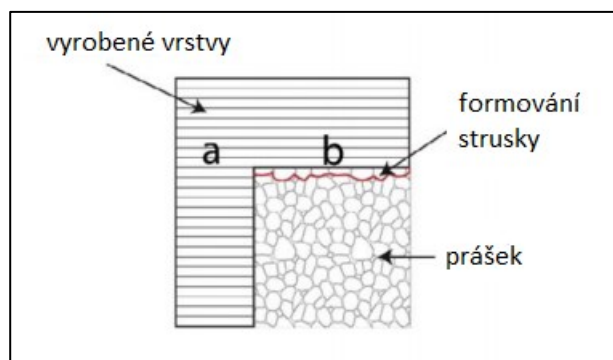
Hlavním problémem technologie selective laser melting je často nedostatečná kvalita povrchu. Hlavní příčinou je tzv. schodovitý efekt, který se vyskytuje víceméně v každé technologii aditivní výroby založené na přidávání materiálu vrstvu po vrstvě.



Obrázek 2.2 – Schodovitý efekt [11]

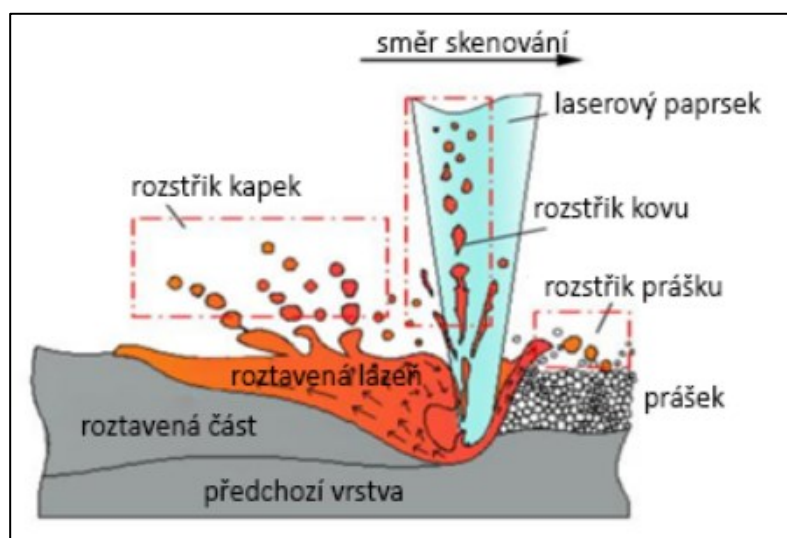
Při výrobě vzniká odchylkou mezi požadovaným a vyrobeným tvarem, především na skloněných a zakřivených stěnách (viz obr. 2.2). Zlepšení může být dosaženo změnou tvaru výrobku nebo pomocí snížení tloušťky vrstvy. To ovšem lze pouze do určitého bodu, jelikož tloušťka vrstvy se odvíjí od velikosti jednotlivých zrn prášku. Tvar součásti také často nelze změnit z funkčních důvodů. Dalším způsobem, jak zmírnit drsnost povrchu vnější plochy může být následná úprava povrchu, jakou je třeba proces leštění [8].

Dalším problémem při vzniku nekvalitního povrchu je tisknutí převislých částí na kovovém prášku viz obrázek. V místech, kde není pod místem tavení pevný materiál dochází k výraznému snížení tepelné vodivosti, a to až stokrát. V těchto oblastech dochází k akumulaci tepla tzn., že dojde ke zvětšení oblasti roztaveného kovu. Vlivem gravitace a kapilárních sil dojde k poklesu taveniny do kovového prášku, který se nachází pod roztaveným materiálem [9].



Obrázek 2.3 – Zhoršení povrchu u převislých ploch [9]

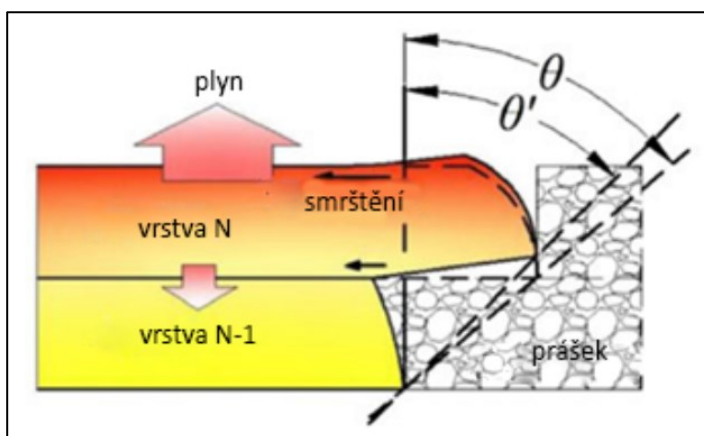
Ulpívání částečně roztaveného prášku na součásti patří mezi další rizika této technologie a také vede ke zhoršení kvality povrchu. Dochází k němu, když laser nataví pouze část zrna, které se spojí se součástí. Tento problém lze zmenšit použitím prášku s menšími velikostmi zrn. Ke zhoršení povrchu v neposlední řadě přispívá rozstřík taveniny nebo prášku při výrobě. Při nárazu vysoce energetického laserového paprsku na materiál vzniká tlak, který dodá části taveniny rychlost, se kterou se dostane mimo místo tavení. Roztavené kapky mají mnohem větší velikost než částice prášku. Přilepením na povrchu součásti komplikují další stavbu, mohou způsobit porozitu materiálu. Snížení tohoto jevu lze docílit úpravou parametrů vstupní energie k nižším hodnotám [8, 11].



Obrázek 2.4 – Rozstřík taveniny [11]

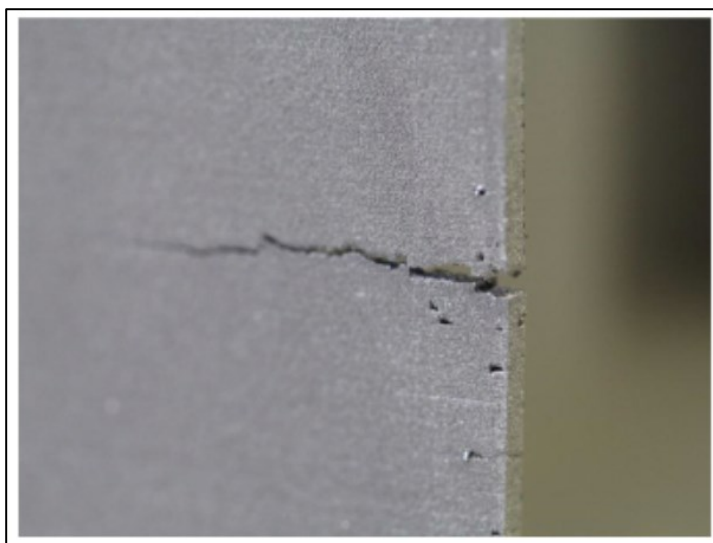
## Deformace

Deformace výrobku patří mezi jednu z hlavních nevýhod. Vlivem rychlých a opakovaných teplotních změn při tavení materiálu a jeho následném chladnutí se v součásti akumuluje zbytkové napětí. Toto napětí se projevuje smršťováním chladnoucí vrchní vrstvy, kterému zabraňuje již ztuhlá předchozí vrstva. Při stavbě přepisných ploch, které podepírá pouze kovový prášek, dochází k deformaci směrem nahoru viz obr. 2.5, způsobenou vnitřním pnutím a nedostatkem podpůrných struktur, které by držely převis na požadovaném místě. Zbytkové napětí negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti vyrobených dílců [12, 14].



Obrázek 2.5 – princip deformace [12]

Pokud tyto vnitřní napětí převyšují mez pevnosti, může v extrémních případech vést až ke vzniku trhliny (viz obr. 2.6) nebo k oddělení součásti od základní platformy. Častěji však dojde pouze k deformaci tvaru, obzvláště v takových případech, kdy součást není dostatečně ukotvena pomocí podpůrných struktur [13].

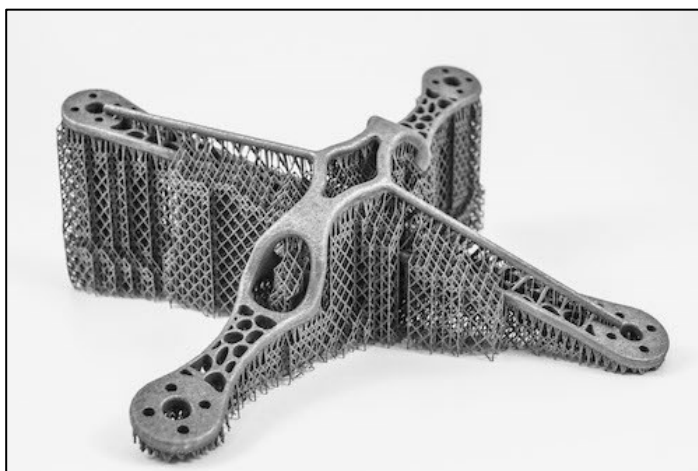


Obrázek 2.6 – Trhlina zapříčiněná velkým vnitřním napětím [14]



## Podpůrné struktury

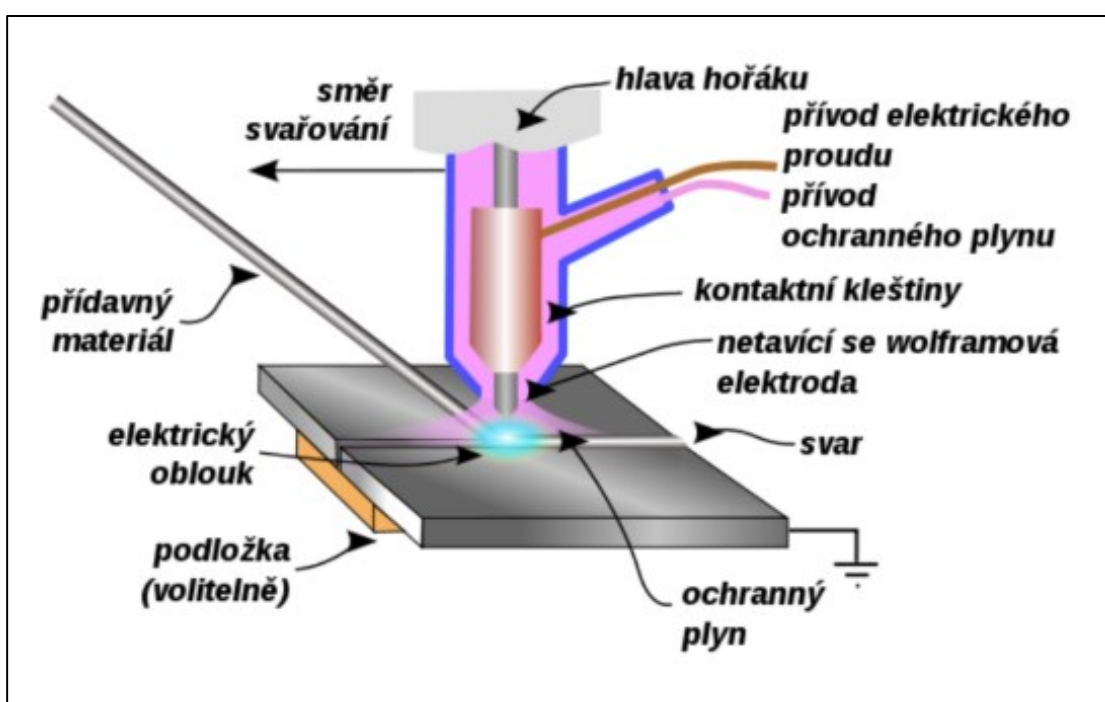
Proces selektivního tavení laserem (SLM) umožňuje výrobu silných, lehkých a složitých kovových struktur. K úspěšné výrobě kovových součástí pomocí SLM jsou zapotřebí další struktury, které podporují přesahující povrchy. Jejich hlavním účelem je odvod tepla pro minimalizaci geometrické deformace vyvolané vnitřním napětím a fixace součástí vůči základní desce. U SLM jsou tyto struktury vytvářené ze stejného materiálu jako je tisknutý produkt. Tyto struktury jsou však často masivní a vyžadují značné úsilí pro jejich odstranění a dodatečné zpracování, jelikož jsou se součástí spojeny na atomární bázi. Velké množství podpůrných struktur zvyšuje spotřebu materiálu, což vede ke snížení efektivity celého procesu a nárůstu času potřebného na výrobu. V konečném důsledku dochází k výraznému zvýšení nákladů na výrobu. Minimalizace podpůrných struktur by proto významně snížila výrobní a dokončovací úsilí a náklady [9].



Obrázek 2.7 – Příklad podpůrné struktury [15]

### 3 Svařování metodou 141 (TIG/WIG)

Svařování netavící se wolframovou elektrodou pracuje na principu hoření elektrického oblouku mezi wolframovou elektrodou a svařencem v ochranné atmosféře, která chrání tavnou lázeň před přístupem vzduchu a zvyšuje stabilitu svařovacího procesu. Působením elektrického oblouku a vysoké teploty dochází k uvolnění velkého množství energie. Na základě přenosu této elektrické energie pak dochází k natavení základního materiálu tedy svařence. Svařování může být provedeno buď pouze roztavením a slitím základních materiálů dohromady (bez použití přídavného materiálu), nebo s přidáním přídavného materiálu (svařovacích kovových drátů podobného složení jako má základní materiál) [16,18].

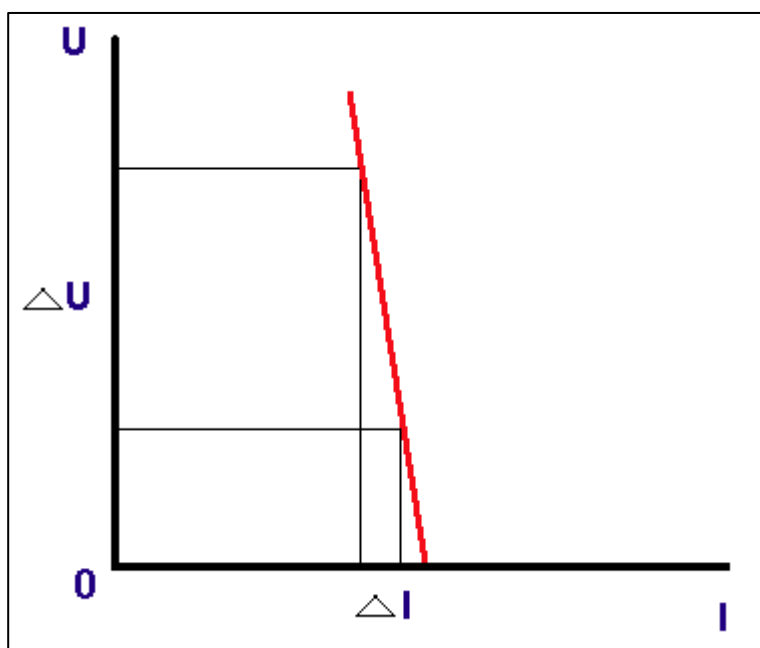


Obrázek 3.1 – Princip svařování metodou TIG [17]

Při svařování TIG drží drát svářeč v jedné ruce hořák a ve druhé drát, který přidává do lázně po kapkách dle potřeby. Právě v tomto případě mluvíme o ručním TIG svařování. TIG svařování lze také částečně mechanizovat, nebo úplně automatizovat. Při částečné mechanizaci stále svářeč v ruce drží hořák, ale drát je podáván bow denem pomocí speciálního podavače do oblouku. Posun drátu je ovládán svářečem, respektive tlačítkem na hořáku. Při úplné automatizaci je hořák upnut v robotu a vše je řízeno automaticky, tedy vedení hořáku i přidávání drátu [18].

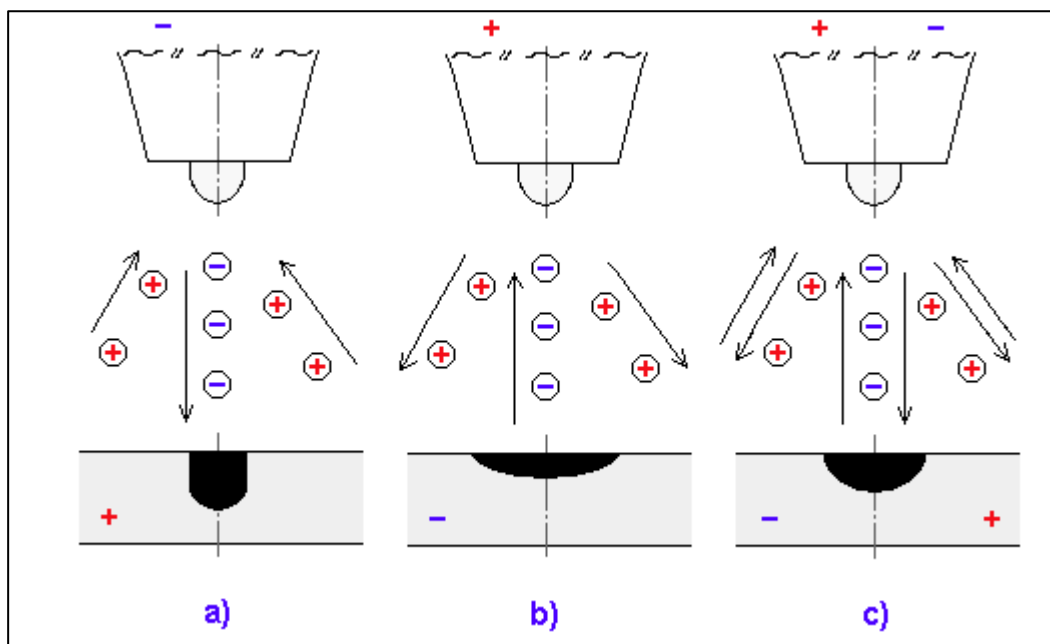
### 3.1 Zdroje svařovacího proudu TIG svařování

Pro svařování TIG se používá zdroj svařovacího proudu s tzv. strmou statickou V-A charakteristikou, tedy v principu stejný zdroj jako pro ruční svařování obalenými elektrodami. Tato charakteristika vyjadřuje závislost napětí a proudu. U této charakteristiky dochází při větších změnách napětí ( $\Delta U$ ) na oblouku jen k minimálním změnám svařovacího proudu ( $\Delta I$ ). Napětí na oblouku je úměrné délce oblouku. Tzn. že i při velké změně délky oblouku (např. vlivem nedokonalosti držení hořáku svářečem v ruce) se svařovací proud mění jen minimálně. [19]



Obrázek 3.2 – Strmá statická V-A charakteristika TIG svářečky [19]

Elektrický oblouk je trvalý elektrický výboj, který vzniká v ionizovaném plynu mezi katodou a anodou. Aby takový oblouk vznikl je zapotřebí elektrický proud vyšší než 0,3 A. Dosahuje vysokých teplot nad 6000 °C a je charakteristický intenzivním tepelným a světelným zářením. Působením vysoké teploty plazmy dochází k narážení kladných iontů na elektrony a vzniká tak ionizace. Parametry samotného elektrického oblouku při svařování metodou TIG jsou závislé na polaritě hořáku a základního materiálu. Pro tuto metodu můžeme použít jak zdroj stejnosměrného proudu (kde rozlišujeme polaritu přímou nebo nepřímou), tak i zdroj střídavého proudu. Pokud hořák s elektrodou zapojíme na kladný pól zdroje, mluvíme o polaritě nepřímé a v opačném případě, když zapojíme hořák na záporný pól zdroje, jedná se o přímou polaritu. Polarita nám ovlivňuje šířku svaru a hloubku průvaru [16, 19].



Obrázek 3.3 – a) přímá polarita, b) nepřímá polarita, c) střídavá polarita [19]

**Přímá polarita** – při TIG svařování stejnosměrným proudem se používá téměř výhradně tzv. přímá polarita, kdy je wolframová elektroda připojena na záporný pól zdroje svařovacího proudu a základní materiál na kladný pól. V praxi to znamená, že hořák připojíte na minusovou svorku svářečky a zemnicí kabel na kladnou svorku. Na záporné elektrodě (tedy na wolframové elektrodě v hořáku) se totiž vyvíjí cca třetina veškerého tepla oblouku, kdežto na kladné elektrodě (základní materiál) zbylé 2/3 tepla. K dispozici máme tedy více tepla pro snadnější tavení materiálu a zároveň wolframová elektroda není tolik tepelně namáhána. Svary zhotovené přímou polaritou jsou úzké a vyznačují se velkou hloubkou závaru, viz obr. 3.3 a) výše [19].

**Nepřímá polarita** – při opačném zapojení bude wolframová elektroda vystavena velkému tepelnému namáhání a hrozí její odtavení. Z netavící se elektrody se tak snadno může stát elektroda tavící se... Přesto se toto ve velmi omezené míře někdy používá v praxi, ale je nutné zajistit intenzivní chlazení wolframové elektrody, a tedy použít speciální svařovací zařízení. Výhodou nepřímé polarity je **čistící efekt**. Nepřímá polarita se tedy používá na materiály potažené odolnou oxidickou vrstvou. Mezi ně patří zejména čistý hliník a jeho slitiny a hořčík. Používá se zpravidla jen na malé tloušťky, které lze svařovat malými proudy, za současného intenzivního chlazení wolframové elektrody. Svary zhotovené nepřímou polaritou jsou široké s malou hloubkou závaru, viz. Obr. 3.3 b) výše [19].

**Střídavá polarita** – Při svařování střídavým proudem dochází k periodickému střídání polarity, viz. Obr. 3.3 c) výše. Střídavý proud nám umožní využít výhod jak přímé, tak

nepřímé polarity zároveň. Při připojení elektrody na plus dochází k čištění základního materiálu od oxidů, ale zároveň je více namáhána wolframová elektroda. Ve druhé fázi je polarita obrácená, wolframová elektroda je připojena na minus a dochází k jejímu částečnému ochlazení a zároveň k většímu natavení základního materiálu. Zjednodušeně tzn., že periodicky dochází ke střídání fáze čištění a fáze svařování. Nebo, že se materiál nejprve očistí a pak svaří [19].

### 3.2 Wolframové elektrody

Wolframové elektrody jsou tyče kruhového průřezu, které mají za úkol přivést elektrický proud do svaru a koncentrovat elektrický oblouk do místa svařování. Elektrody pro TIG svařování lze rozdělit podle příměsí (legur). Kromě nelegované elektrody z čistého wolframu se používají elektrody legované oxidy Thoria, Lanthanu, Ceria a Zirkonu. Na výrobu elektrod se využívá wolfram z důvodu jeho vysoké teploty tavení 3410 °C. S využitím legur se blíží teplota tavení až k 4200 °C. Pro snadné odlišení jednotlivých typů se používá barevného značení vždy jednoho konce elektrody. Přiřazení barev jednotlivým typům najdeme v následující tabulce: [20]

Tabulka 3.1 – Přiřazení barev jednotlivým typům elektrod [20]

Označení elektrody	Barva	Legování
WP	zelená	čistý wolfram 99,8%
WT 10	žlutá	thorium 1% ThO <sub>2</sub>
WT 20	červená	thorium 2% ThO <sub>2</sub>
WT 30	fialová	thorium 3% ThO <sub>2</sub>
WT 40	oranžová	thorium 4% ThO <sub>2</sub>
WC 20	šedá	cerium 2,0% CeO <sub>2</sub>
WL 10	černá	lanthan 1,0% LaO <sub>2</sub>
WL 15	zlatá	lanthan 1,5 % LaO <sub>2</sub>
WL 20	modrá	lanthan 2,0% LaO <sub>2</sub>
WZ 08	bílá	zirkon 0,8% ZrO <sub>2</sub>

**WP** – Obsahují čistý wolfram. Tato elektroda je vhodná pro svařování slitin hliníku střídavým proudem, kde vyniká dobrou stabilitou oblouku a je značena zelenou barvou. Není vhodná pro svařování stejnosměrným proudem. Jako jediná se WP elektroda nebrousí do špičky [20].

**WT 10, 20, 30, 40** – Tyto elektrody obsahují thorium a jejich barevné označení se liší podle velikosti obsahu thoria od 1% (žlutá), 2% (červená), 3% (fialová) až do 4% (oranžová). Thorium způsobuje snížení výstupní práce a zvýšení emise elektronů. Se stoupajícím obsahem thoria se zlepšuje [20]:

- zapalovací vlastnosti
- trvanlivost
- proudová zatížitelnost

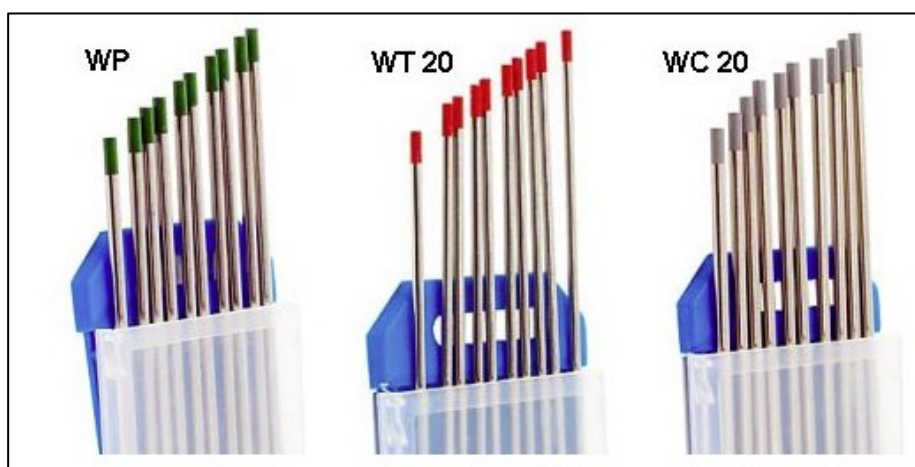
Hlavní použití těchto elektrod je při svařování vysoce legovaných a nerezových ocelí stejnosměrným proudem, kde vyznačují výborné vlastnosti. Thorium je radioaktivní prvek. Se stoupajícím obsahem thoria roste radioaktivita těchto elektrod. Nebezpečí thoriových elektrod není v záření gama, ale v záření alfa. Radioaktivní částice se usazují v plicích a v nejhorším případě mohou způsobit rakovinu. Pokud jsou přesto použity, je nutné důkladné odsávání při broušení i při svařování. Práce s těmito elektrodami bez těchto opatření je nezodpovědná a vede ke komplikacím z hlediska bezpečnosti práce. Protože v zemích EU jsou již elektrody WT zakázány došlo k přechodu od WT elektrod k elektrodám WC a WL [20].

**WC 20** – Cerované elektrody jsou univerzální pro téměř všechna použití. Obsahují 2% ceria a značí se šedou barvou. Lze je použít pro svařování stejnosměrným i střídavým proudem. Elektrody jsou vhodné pro svařování nelegovaných i legovaných ocelí, slitin hliníku, slitin titanu, niklu, mědi a hořčíku. WC elektrody mají svářecí vlastnosti podobné jako WT elektrody, což je dobrá trvanlivost a proudová zatížitelnost. Podstatně méně však zatěžují životní prostředí a zdraví svářeče [20].

**WL 10, 15, 20** – Lanthanované elektrody jsou stejně jako WC elektrody univerzální pro téměř všechna použití při svařování střídavým i stejnosměrným proudem. Jejich barevné značení závisí na velikosti obsahu lathanu, 1% (černá), 1,5% (zlatá) a 2% (modrá). Lanthanované elektrody předstihují cerované zejména v oblasti nízkých proudů. Jsou tak vhodné i pro svařování plasmou a mikroplasmou. Vyšší podíl lathanu usnadňuje zapalování, zejména při automatizovaném svařování [20].

**WZ 08** – Obsahují zirkon a značí se bílou barvou. Zirkon minimalizuje tvorbu wolframových vměstků ve svarovém kovu. Použití je hlavně pro střídavý proud, a tedy pro svařování hliníkových materiálů jako náhrada WP elektrod. Pro stejnosměrný proud je lze použít jen podmíněně [20].

Obecně se dnes zavádějí jako standardy elektrody WC 20 (šedá) a WL 15 (zlatá). Tyto typy pokrývají široký okruh materiálů jako je hliník, nerez, uhlíková ocel, bronz, titan, měď atd. [20].

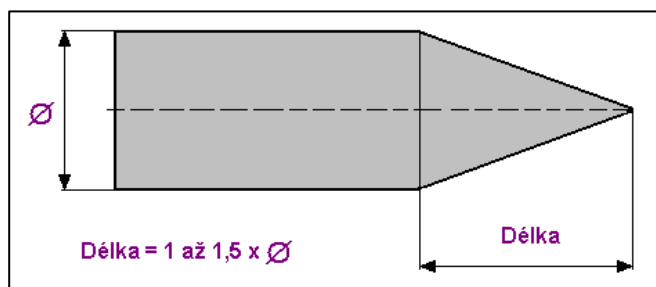


Obrázek 3.4 – Ukázka některých wolframových elektrod pro TIG svařování [20]

Výroba wolframových elektrod je normována dle ČSN EN ISO 6848 a standardně se vyrábějí v těchto průměrech: 1,0; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0; 4,8; 6,0 a 6,4 mm v délkách 50, 75, 150 a 175 mm [20]

Průměr elektrody pro svařování odvodíme z velikosti a druhu použitého proudu, polarity, složení ochranného plynu a druhu základního materiálu. Výrobci doporučují, aby použitý průměr elektrody byl rovněž vzdáleností od materiálu, tedy elektroda o průměru 2,4 mm má být udržována ve vzdálenosti 2,4 mm od základního materiálu. Délka oblouku by měla být po celou dobu svařování udržována stejná [20].

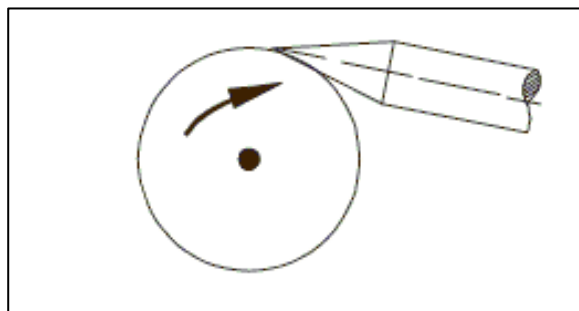
Průběh svařování a kvalita svarového spoje je ve velké míře ovlivněna tvarem hrotu elektrody. Elektrody se brousí do špičky. Délka špičky má být asi 1 - 1,5 násobek průměru (např. 2,4 mm = délka špičky 2,4 - 3,6 mm) [20].



Obrázek 3.5 – Vztah délky špičky k průměru elektrody [20]

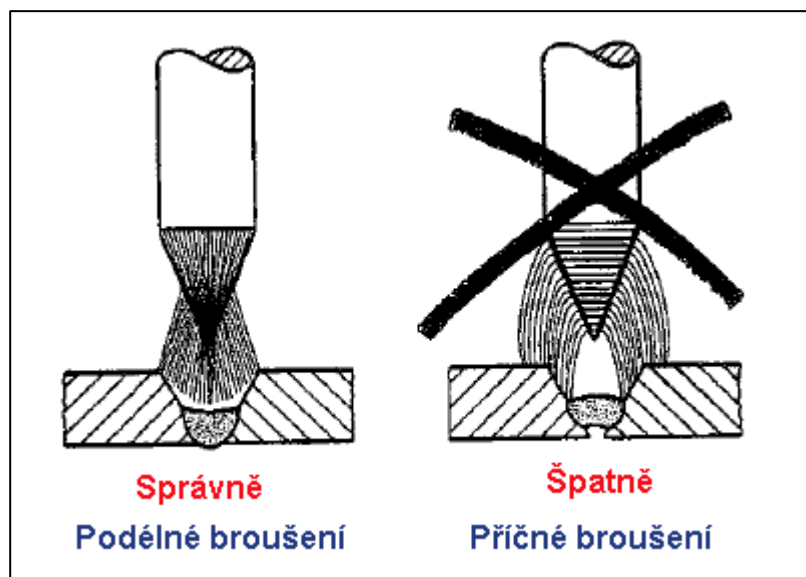
Konce hrotu wolframových elektrod jsou broušeny do určitého tvaru, nejčastěji do špičky. Po obroušení špičky, musí dojít k jejímu otupení, čímž se významně sníží její zatížení

a prodlouží její životnost. Elektroda se musí brousit tak, aby vrypy na elektrodě byly rovnoběžně s podélnou osou, jinak by vznikl nestabilní oblouk. Před broušením je nutno zkontrolovat, aby konec elektrody nebyl nalomen nebo naříznut. Broušení elektrod musí probíhat nanejvýš opatrně, aby se zabránilo poškození hranic zrn mechanickou silou. Broušení je prováděno jen lehkým tlakem, protože při velké tvorbě tepla může dojít rovněž k napětí v zrnech a poškození hranic zrn. Čím jemnější broušení je, tím je vyšší životnost elektrody. Elektroda by se měla brousit podélně tak, aby vrypy po broušení byly rovnoběžně s podélnou osou elektrody [20].



Obrázek 3.6 – Podélné broušení elektrody [20]

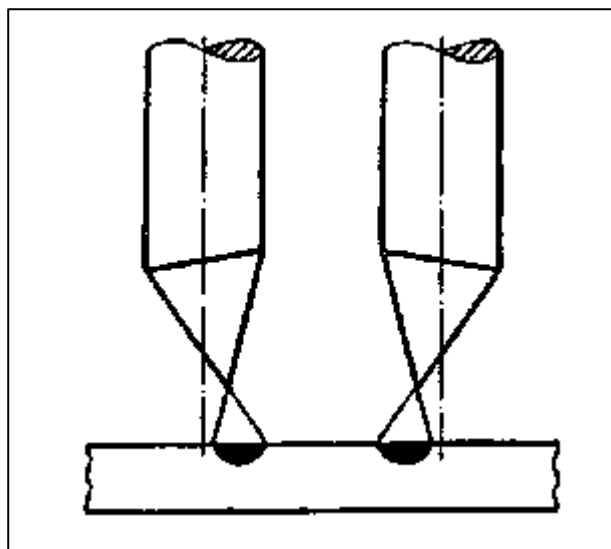
Při příčném broušení způsobují rýhy nestabilní oblouk a vylamování částech wolframu, které se potom mohou dostat do lázně. Nehledě na to, že při příčném broušení bychom elektrodu snadno zlomili. Elektrodu je při broušení nutné otáčet velmi pomalu. Vliv směru broušení ukazuje následující obrázek [20].



Obrázek 3.7 – Vliv směru broušení špičky [20]

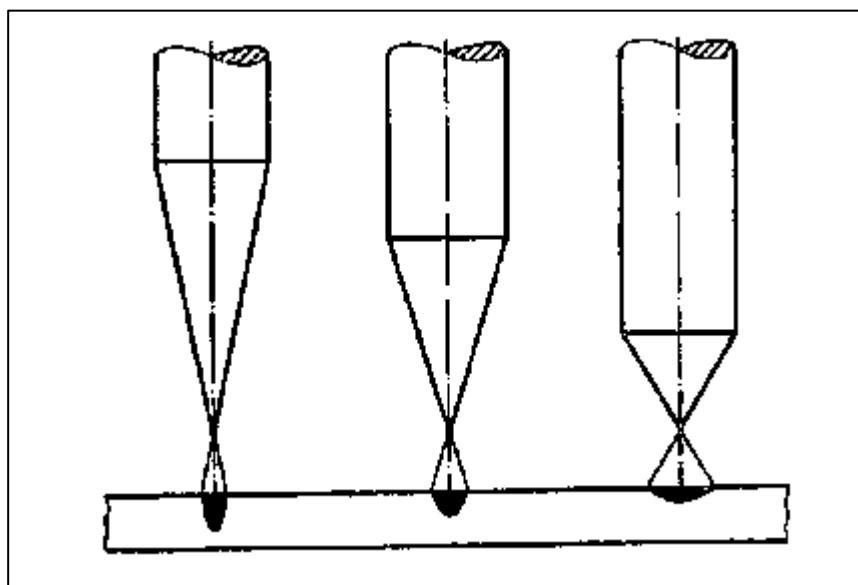
Je důležité, aby špička byla v ose elektrody. Při vychýlení vzniká nebezpečí nestabilního oblouku a při svařování nemusí být svařovací energie přivedena na požadované místo.





Obrázek 3.8 – Vliv excentricity špičky na svařování metodou TIG [20]

Další rozhodující vliv na kvalitu svaru má úhel broušení špičky. Elektrický oblouk je zrcadlovým obrazem úhlu broušení. Ostrý úhel elektrody přenáší energii na malou plochu s velkým natavením. Tupý úhel elektrody přenáší stejný svařovací proud na velkou plochu s poměrně mělkým natavením. Jak již bylo uvedeno výše, platí že délka špičky má být asi 1 - 1,5 násobek průměru. Z toho vyplývá úhel zbroušení. Je ale samozřejmě možné pro dané podmínky zvolit úhel jiný [20].



Obrázek 3.9 – Vliv geometrie špičky na svařování metodou TIG [20]

Následující tabulka zobrazuje, jaké rozsahy proudu můžeme použít pro wolframové elektrody různých průměrů. Tabulka je sestavena zvlášť pro elektrody z čistého wolframu a pro legované elektrody. Dále je zohledněn druh proudu a v případě stejnosměrného proudu také polarita [20].

Tabulka 3.2 – Proudová zatížitelnost wolframových elektrod [20]

Proudová zatížitelnost wolframových elektrod						
Průměr elektrody v mm	Stejnoseměrný proud v A				Střídavý proud v A	
	- pól		+ pól			
	Wolframové	Legované	Wolframové	Legované	Wolframové	Legované
1.0	do 65	do 75	-	-	do 25	do 30
1.6	45-90	60-160	do 20	do 20	30-90	30-120
2.4	80-160	150-250	10-25	10-25	80-140	100-210
3.2	150-290	220-330	15-30	15-30	130-190	150-260
4.0	180-260	310-490	25-45	25-45	180-270	240-350
4.8	240-450	460-640	40-60	40-60	250-350	310-450
6.4	650-800	480-850	50-90	50-90	320-460	380-530

Z tabulky je mimo jiné také patrné proč vám wolframová elektroda shoří, pokud omylem připojíte hořák na plusový vývod vašeho svářecího invertoru.

### 3.3 Ochranné plyny (atmosféry)

Ochranný plyn při svařování metodou 141 zabezpečuje ochranu svarové lázně, wolframové elektrody a základního materiálu před atmosférickými plyny, například kyslíkem, dusíkem, oxidem uhličitým a vodní párou. V závislosti na svařovaných materiálech tyto atmosférické plyny mohou snížit kvalitu svaru nebo ztížit použití svařovacího procesu. Nejvíce se používá argon a helium, nebo jejich směsi [16].

**Argon** – Je to nejpoužívanější inertní plyn pro svařování. Tento plyn nemá chuť, žádný zápach ani barvu. Díky jeho malé tepelné vodivosti a nízké ionizační energii podporuje klidný a stabilní oblouk [16].

**Helium** – Patří mezi inertní plyny stejně jako argon. Nemá barvu, zápach ani chuť. Díky jeho nízké ionizační schopnosti poskytuje vysoký tepelný výkon i vyšší rychlost svařování. Čisté helium se používá jen zřídka, a především pro svařování větších tloušťek. Oblouk se díky heliu hůř zapaluje a obtížněji hoří. Jeho další nevýhodou je nutnost použít zdroj s vysokým napětím naprázdno. Díky jeho malé hustotě je potřeba ho přivádět do svarové lázně ve velkém množství, což je vzhledem k jeho poměrně vysoké ceně dost nevýhodné. V praxi se proto používá téměř výhradně v kombinaci s argonem [16].

**Směs argon + helium** – Přidáním helia do argonu vzrůstá teplota oblouku. Vlastnosti směsí těchto plynů se využívají především při svařování materiálů s velkou tepelnou vodivostí a při větších tloušťkách svařovaného materiálu. V důsledku vyššího tepelného výkonu lze totiž svařovat vyšší rychlostí než za použití pouze čistého argonu [16].

### 3.4 Výhody a nevýhody svařování metodou 141 (TIG/WIG)

**Výhody** – Základní výhodou této svařovací metody je výborná kontrola nad svarovou lázní. Na rozdíl od ostatních metod svařování elektrickým obloukem, nedochází u TIG k neustálému přísunu přídatného materiálu do lázně a svářeč může daleko lépe ovlivňovat svarovou lázeň a tím i vlastnosti svarového spoje. Touto metodou lze svařovat úplně bez přídatného materiálu, a to je z metalurgického hlediska úplně nejlepší, protože svarový kov má shodné chemické složení jako základní materiál. Další výhodou je vysoká teplota oblouku, díky které je možné svařovat tvrdší materiály, zejména vysocelegované ocele. Teplotní pole při svařování je velmi úzké a nedochází proto k velkému tepelnému ovlivnění základního materiálu v tak širokém pásmu okolo svaru, a naopak je možné dosáhnout velké hloubky závaru. To má mimo jiné i pozitivní vliv na tepelné deformace svaru. Navíc je možné přísun tepla do svaru efektivně regulovat. TIG oblouk je totiž možné v určitých případech tvarovat (prodlužovat či zkracovat, zužovat či rozšiřovat a ohýbat) a dosahovat tak různých tepelných účinků na svařovaný materiál. Další výhodou je výborná ochrana svarové lázně před škodlivými účinky vzduchu. Z dalších pozitivních vlastností můžeme například uvést, že je možno svařovat ve všech polohách. Touto metodou máme možnost, díky malým svařovacím proudům, svařovat velmi tenké materiály [20].

**Nevýhody** – Mezi nevýhody patří vysoká technická náročnost na svařovací zařízení. Tyto zařízení jsou komplikovanější a dražší než svářečky pro jiné svářecí metody. To platí zejména pro svařování střídavým proudem. Zásadní nevýhodou je díky pomalému a preciznímu svařování malá produktivita. Proto se TIG svařování nehodí pro velkosériovou výrobu jednoduchých svařenců, ale spíše na tvarově složitější konstrukce z ušlechtilých materiálů [20].

## **4 Kvalifikace svarových spojů dle normy ČSN EN ISO 15614-1**

Primárním účelem kvalifikace postupu svařování je prokázat, že metoda spojení navrhovaná pro konstrukci je schopná vytvořit spoje, které mají potřebné mechanické vlastnosti pro zamýšlené použití. Norma ČSN EN ISO 15614-1 se zabývá stanovením a klasifikací postupů svařování (pWPS) kovových materiálů se zaměřením na obloukové a plamenové svařování. Dále tato norma definuje, jaké zkoušky budou provedeny na zkušebních kusech. Pro předmět mé diplomové práce byly z normy ČSN EN ISO 15614-1 vybrány zkoušky a postupy, které jsou v souladu s pravidly obsaženými v této normě [21].

### **Předmět normy**

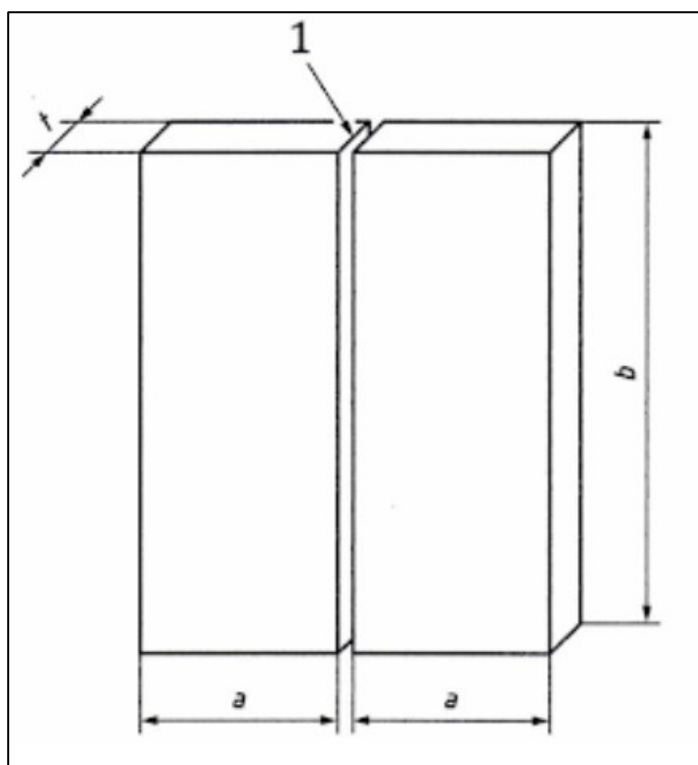
Stanovení způsobu kvalifikace předběžné specifikace postupu svařování zkouškami postupu svařování je hlavním předmětem této normy. Norma definuje podmínky provádění zkoušek postupu svařování a rozsah kvalifikace pro postupy svařování pro všechny praktické svařečské operace v oblasti proměnných. Zkoušky musí být uskutečněny prostřednictvím této normy. Za výrobní normy mohou být považovány doplňující zkoušky. Norma je platná pro plamenové a obloukové svařování ocelí všech tvarů výrobků a také pro obloukové svařování Ni a slitin Ni všech tvarů výrobku. Obloukové a plamenové svařování zahrnuje podle EN ISO 4063 tyto metody svařování [21]:

- 111 – obloukové svařování obalenou elektrodou
- 114 – obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu
- 12 – svařování pod tavidlem
- 131 – obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG)
- 135 – obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (MAG)
- 136 – obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu
- 137 – obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu
- 141 – obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG)
- 15 – svařování plazmové
- 311 – svařování plamenové

### **4.1 Zkušební kus**

Svarový spoj, který bude zhotoven podle navrženého postupu svařování, musí být reprezentován vyrobeným normalizovaným zkušebním kusem nebo kusy, které mají příslušnou geometrii a jsou na ně kladeny specifické požadavky. Délka a počet zkoušených kusů musí být dostačující, aby bylo možné provést všechny potřebné zkoušky. Pro zvláštní vzorky nebo pro vzorky, kde dojde k opakovanému zkoušení, mohou být připraveny doplňující zkušební vzorky s větší délkou, než je minimální rozměr. Pro všechny zkušební

kusy platí, že pro svařované plechy/trubky musí být tloušťka základního materiálu „t“ stejná. Pokud je výrobkovou normou požadována zkouška rázem v ohybu s vrubem umístěným v tepelně ovlivněné oblasti, pak je nutné, aby na zkušební vzorku byl vyznačen směr válcování plechu. Jestliže zkušební kus nevyhovuje, nebo nesplňuje některé požadavky nedestruktivních kontrol, musí být svařen další kus, který bude podroben stejnému zkoušení. Zkouška je provede za nevyhovující v případě, že nový zkušební kus nesplňuje potřebné požadavky. Tvar a minimální rozměry jsou rozdílné podle druhu svaru a zkušebního vzorku, jako jsou například tupé spoje na plechu s plným průvarem, T spoj a další [21].



Obrázek 4.1 – Zkušební kus pro tupý spoj na plechu s plným průvarem [21]

**Legenda:**

- 1 - Příprava spoje a sestavení podle podrobností uvedených v předběžné specifikaci postupu svařování (pWPS)
- a - Minimální rozměr 150 mm
- b - Minimální rozměr 350 m
- t – Tloušťka materiálu

## 4.2 Svařování zkušebních kusů

Příprava a svařování zkušebních kusů musí být provedeno podle postupů pWPS a za všeobecných podmínek svařování ve výrobě. Polohy svařování a meze pro úhel sklonu a otočení zkušebního kusu musí být dle normy EN ISO 6947. Svařování a zkoušení musí být osvědčeno odbornou a zaškolenou obsluhou, zkušebním orgánem či organizací [21].

## 4.3 Kontrola a zkoušení zkušebních vzorků

Rozsah zkoušení se skládá z nedestruktivních i destruktivních zkoušek, které by měly vyhovovat požadavkům v tabulce 4.1 [21].

Tabulka 4.1 – Kontrola a zkoušení zkušebních kusů [21]

Zkušební kus	Druh zkoušek	Rozsahy zkoušení
<b>Tupý spoj s plným průvarem</b>	Vizuální kontrola	100%
	Radiografická nebo ultrazvuková zkouška	100%
	Zkouška na povrchové trhliny	100%
	Příčná zkouška tahem	2 vzorky
	Příčná zkouška lámavosti	4 vzorky
	Zkouška rázem v ohybu	2 sady
	Zkouška tvrdosti	Požadována
	Kontrola makrostruktury	1 vzorek
<b>T-spoj s plným průvarem</b>	Vizuální kontrola	100%
	Zkouška na povrchové trhliny	100%
	Radiografická nebo ultrazvuková zkouška	100%
	Zkouška tvrdosti	Požadována
	Kontrola makrostruktury	2 vzorky
<b>Koutové svary</b>	Vizuální kontrola	100%
	Zkouška na povrchové trhliny	100%
	Zkouška tvrdosti	Požadována
	Kontrola makrostruktury	2 vzorky

Výrobková norma může určit doplňující zkoušky, jako například:

Podélnou zkoušku tahem svarového kovu spoje, korozní zkoušky, mikroskopické zkoušky, zkoušky lámavosti čistého svarového kovu, chemický rozbor, měření obsahu feritu –  $\delta$ , zkoušky tahem křížových spojů. [21]

Pro výzkumné účely této práce nemohly být zkoušky provedeny v plném rozsahu, tak jak uvádí tabulka výše, pouze z této normy vychází.

## 5 Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušky představují důležitý článek při zjišťování jakosti ve všech etapách výroby a provozní spolehlivosti. Význam nedestruktivní kontroly spočívá v zajištění kvality výrobku, jeho technické způsobilosti a funkční bezpečnosti. Při výrobě a zpracování kovů se mohou vyskytnout různé vady, které se dají obtížně zjistit. Dělí se na vady materiálu vnější a vnitřní. Mezi nejčastější vady patří bubliny, staženiny, vměstky, vnější a vnitřní trhliny, studené spoje aj [22, 23].

K zjišťování povrchových vad se používají metody:

- vizuální
- penetrační (kapilární)
- magnetická prášková

Vnitřní vady se zjišťují metodami:

- prozářením
- ultrazvukem

Před nedestruktivním zkoušením je nutné, aby byla dokončená všechna tepelná zpracování po svařování.

### 5.1 Vizuální metoda

Je to nejjednodušší a zároveň nejdostupnější a nejlevnější kontrola svarů, kdy stačí kontrolu provést prostým zrakem nebo v přísnější podobě pomocí zraku a optických přístrojů s několikanásobným zvětšením (jako je např. lupa), zjišťujeme povrchové defekty a ověřujeme splnění podmínek pro další eventuální nedestruktivní kontrolu. Podle použitých kontrolních prostředků se rozlišuje vizuální kontrola na [22]:

- **Přímou** – Prováděnou pouhým okem nebo při použití jednoduchých zvětšovacích pomůcek (lupy). Úhel pozorování je minimálně 30° od roviny kontrolovaného povrchu.
- **Nepřímou** – Prováděnou pomocí optických přístrojů např. endoskopy, abychom mohli rozeznat na povrchu detaily, které nejsou přímou vizuální zkouškou pozorovatelné, např. vnitřní povrch trubek.

Základem této zkoušky je několik předpokladů [22]:

- dobře očištěný povrch svaru od strusky, rozstříku apod.
  - dobře přístupný povrch svaru pro vizuální prohlídku,
  - dobré osvětlení prohlíženého místa přirozeným nebo umělým světlem
  - ostrý zrak zkoušejícího, který je schopen rozeznat požadované drobné detaily
- Vizuální

Hodnocení vizuální kontrolou má následovat po každém svařovacím procesu, jehož provedení je spojeno s určitými těžkostmi. V případech dílčí pochybnosti může být vizuální zkouška účelně doplněna magnetickou nebo např. kapilární zkouškou. Provádění vizuální kontroly se řídí dle normy ČSN EN ISO 17637 [22, 34].

## 5.2 Penetrační (kapilární) metoda

Tato metoda umožňuje pouze zjišťovat povrchové vady, které však musí být na povrchu otevřené, aby do nich mohla vniknout detekční tekutina. Je tedy založena na vztlínivosti některých kapali do otevřených dutin v materiálu. Při penetrační zkoušce se využívá kapilárních jevů, především smáčivosti a vztlínivosti. Před zahájením zkoušky je potřeba dokonale připravit povrch, umytím a odmaštěním zkoušeného povrchu. Samotná zkouška probíhá tak, že se nanese zkušební kapalina (penetrant) na zkoušený povrch (aplikace detekční tekutiny se provádí u menších svařenců ponořením do lázně, u větších pak natíráním nebo nastříkáním). Další fází je odstranění přebytku penetrantu umytím povrchu od zkušební kapaliny a následuje osušení povrchu a vyvolání indikace. Poslední fází je prohlídka zkoušeného povrchu a případné posouzení a vyhodnocení indikovaných vad [22].

Podle penetračních prostředků rozeznáváme:

- **Metodu barevné indikace** – přítomnost vady se projeví vznikem kontrastní barevné indikace, hodnocení se provádí na denním světle
- **Metodu fluorescenční** – zkušební kapalina je pro zvýšení citlivosti fluoreskující a vada se projeví světélkující indikací při ozáření ultrafialovým světlem, nepoužívá se proto vývojka.

Výhodou této metody je nenáročnost, nízká cena, snadná indikace vad a poměrně velká citlivost. Nevýhodou je odhalení pouze vad spojených s povrchem, potřeba čistého a hladkého povrchu. Kapilární zkouška se provádí podle normy ČSN EN ISO 3452-1 [22, 34].



## 6 Destruktivní zkoušky

Destruktivní zkoušky jsou obdobou zkoušek na zjišťování mechanických vlastností materiálů. Mezi základní destruktivní zkoušky patří [21]:

- příčná zkouška tahem
- zkouška lámavosti
- zkouška rázem v ohybu
- zkouška mikro a makro struktury
- zkouška tvrdosti

Při zkoušení deformačními metodami dochází k trvalé deformaci zkušebních vzorků, a proto jsou aplikovány a odebírány v potřebném množství podle příslušné normy ČSN EN ISO 15614-1 [21].

### 6.1 Příčná zkouška tahem

Je to nejrozšířenější a zároveň nejdůležitější statická zkouška. Provádí se na trhacím stroji, kde se tyč postupně zatěžuje tahovým napětím až do přetržení. Při zatížení vzorku se zaznamenává závislost prodloužení zkušebního kusu na působící sílu  $F$ , ze které jsou následně určeny hodnoty [24]:

- Mez pevnosti  $R_m$
- Mez kluzu  $R_e$
- Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$
- Tažnost  $A$
- Kontrakce  $Z$

Pevnost v tahu zkušební tyče nesmí být nižší, než je odpovídající minimální předepsaná hodnota pevnosti v tahu základního materiálu, pokud to nebylo stanoveno před začátkem zkoušení jinak. U spojů z různorodých základních materiálů nesmí být pevnost v tahu nižší než minimální hodnota u materiálu s nižší pevností v tahu [21].

Přepočtem dle vztahů získáme závislost  $\sigma - \varepsilon$ .

$$\sigma = \frac{F}{S} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Obrázek 6.1 – Přepočet vztahů pro tahovou zkoušku [25]

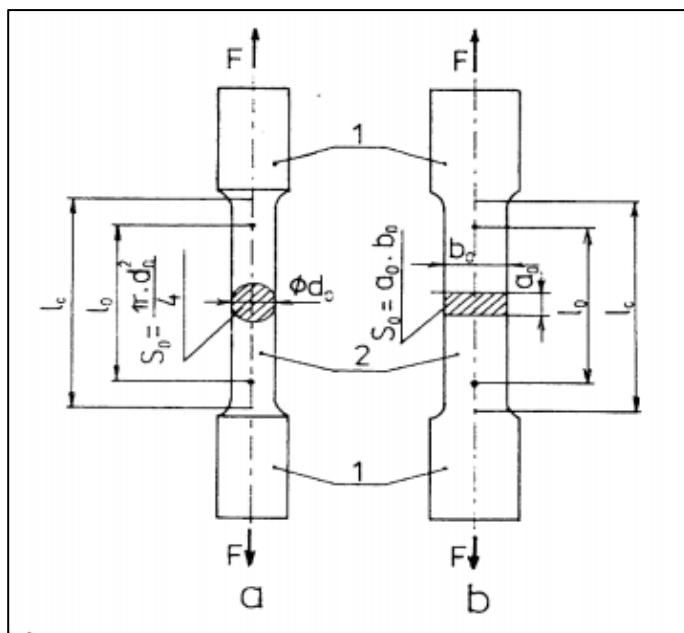
Kde:

$S$  – plocha průřezu vzorku ( $m^2$ ,  $mm^2$ )

$\sigma$  – tahové napětí (Pa, MPa)

$L_0$  – původní délka vzorku (m, mm)

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení (-)



Obrázek 6.2 – a) zkušební tyč pro trubky, b) zkušební tyč pro plechy [25]

### 6.3 Zkoušení tvrdosti

Zkoušky tvrdosti se realizují podle dle Vickerse HV10 a musí být provedeny dle příslušných norem. Měření se provádějí ve svarovém kovu v tepelně ovlivněných oblastech a v základním materiálu tak, aby mohl být vyhodnocen průběh tvrdosti napříč svarovým spojem. U materiálu s tloušťkou pod 5 mm se provádějí vtisky pouze v jedné řadě a to maximálně 2 mm pod horním povrchem svarového spoje. Naopak pro materiály s tloušťkou nad 5 mm musí být zhotoveny 2 řady vtisků, které budou umístěny 2 mm pod horním i spodním povrchem svarových spojů [21].

Každá řada vtisků musí mít minimálně 3 jednotlivé vtisky v každé z následujících oblastí:

- Svar
- Obě TOO
- Oba základní materiály

Výsledky musí splňovat požadavky, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 6.1 – Maximální přípustné hodnoty tvrdosti (HV 10) [21]

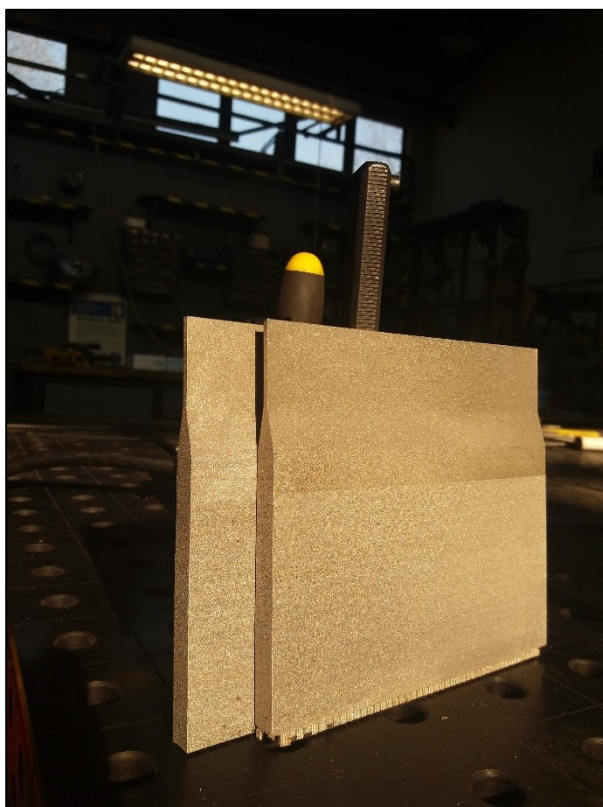
Skupiny oceli CR ISO 15608	Tepelně nezpracované	Tepelně zpracované
1 <sup>a</sup> , 2	380	320
3 <sup>b</sup>	450	380
4, 5	380	320
6	-	350
9.1	350	300
9.2	450	350
9.3	450	350
<sup>a</sup> Pokud jsou požadovány zkoušky tvrdosti		
<sup>b</sup> Pro oceli s $\min R_{eH} > 890 \text{ N/mm}^2$ musí být stanoveny zvláštní hodnoty		

## 6.4 Makroskopická kontrola

Základní kontrolní zkouškou jakosti svaru je právě makroskopická kontrola. Provádí se vizuální prohlídkou (pouhým okem), popřípadě optickým zvětšením, např. lupou do maximálního zvětšení 30x. Kontrola je prováděna na vzorku, který je odebrán příčným řezem na osu svaru. Zkušební kus musí obsahovat neovlivněný základní materiál, svarový kov a tepelně ovlivněné oblasti. Po očištění a případně naleptání povrchu vzorku umožňuje posoudit přítomnost vad a tím tak kvalitu svarového spoje, tvar svaru, způsob kladení svarových vrstev, spojení jednotlivých svarových housenek, zředění svarového kovu se základním materiálem, dále pak tvar a rozsah tepelně ovlivněné oblasti [21, 27].

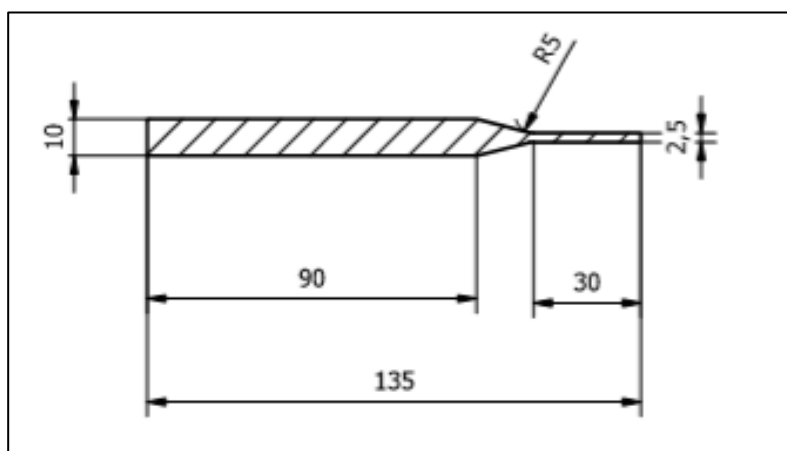
## 7 Praktická část

Úkolem experimentální části této diplomové práce je zkoumání vlivu technologie svařování na vlastnosti a makrostrukturu svarového spoje na vzorcích, které jsou zhotoveny pomocí 3D tisku. Tyto vzorky jsou vyrobeny z nerezové oceli 316L, viz obrázek 7.1, pomocí technologie SLM. Zkušební desky byly svařeny technologií TIG bez přídavného materiálu. Vzorky jsou svařeny tupým svarovým spojem bez úpravy svarových ploch.



Obrázek 7.1 – Zkušební desky vyrobené 3D tiskem

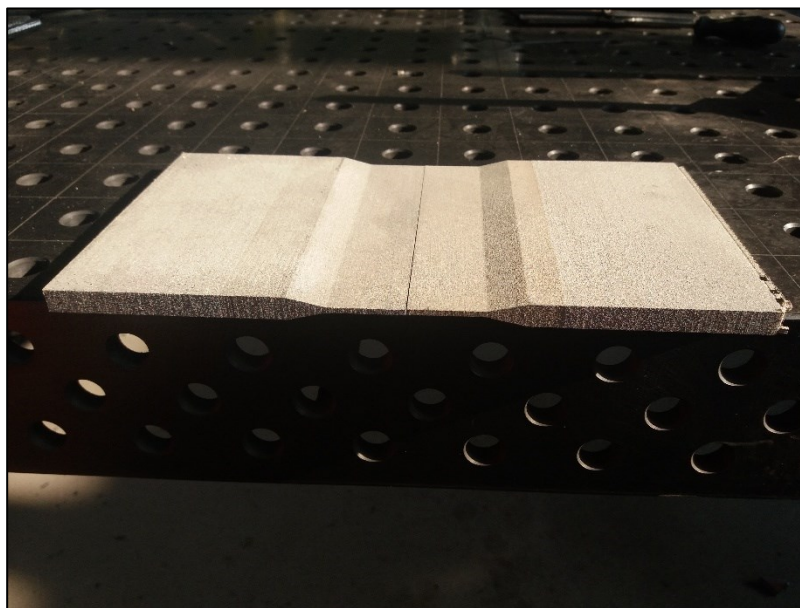
Schéma vyrobené součásti pomocí 3D tisku o délce 135 mm.



Obrázek 7.2 – Schéma výrobku

Pomocí 3D tisku byly technologií SLM vyrobeny zkušební vzorky z oceli 316L, které byly tepelně zpracovány (pouze některé, ne všechny) a svařeny. Následně byly podrobeny nedestruktivním zkouškám (vizuální, kapilární a rentgen) a destruktivnímu zkoušení (zkouška tahem, zkouška tvrdosti, mikro a makroskopické zkoušky). Vzorky byly vytvořeny za účelem zjistit jejich vlastnosti.

Vzorky jsou označeny 3D1, 3D2, 3D3 a 3D4. Tepelné zpracování se provádělo u vzorků 3D3 a 3D4.



*Obrázek 7.3 – Nesvařené vyrobené desky*

## **7.1 Chemické a mechanické vlastnosti materiálu 316L**

316L (1.4404) je kyselinovzdorná chrom-nikl-molybdenová ocel s nízkým obsahem uhlíku do 0,03. Je vysoce odolná proti koncentrovaným kyselinám jak organickým, tak i anorganickým, samozřejmě při dodržení nižší koncentrace a při střední úrovni teplot. Má výrazně zvýšenou odolnost proti všem typům koroze. Tato jakost má mírný sklon k důlkové korozi způsobené pnutím v roztocích chlóru. Je velmi dobře svařitelná a leštitelná. Její výhodou je, že po svařování si ocel zachovává svou vysokou odolnost proti mezikrystalové korozi. Materiál se vyznačuje velice dobrými mechanickými vlastnostmi při lisování, ohýbání a tažení. Tato ocel se často používá v chemickém průmyslu, v zařízeních pro styk s mořskou vodou a pro výrobu bazénových doplňků a technologií, ale také třeba pro chirurgické nástroje [28].

Tabulka 7.1 – Chemické složení materiálu 316L (1.4404) [29]

Chem. Prvek	Obsah v %
Cr	16-18
Ni	10-14
Mo	2-3
Mn	≤ 2
Si	≤ 1
N	≤ 0,10
O	≤ 0,10
P	≤ 0,045
C	≤ 0,03
S	≤ 0,03
Fe	zbytek

Tabulka 7.2 – Fyzikální vlastnosti oceli 316L (1.4404) [29]

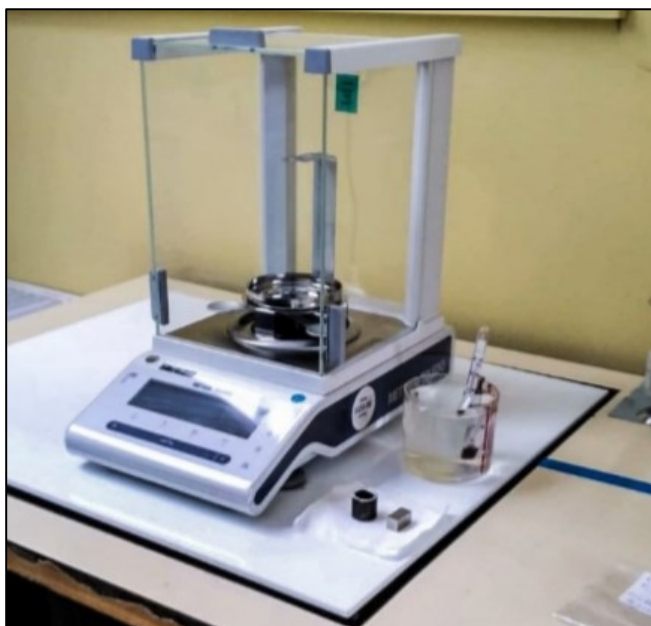
Veličina	Hodnota
hustota	7.99 g/cm <sup>3</sup>
tepelná vodivost	16.2 W/mK
bod tání	1 371 °C - 1 399 °C
součinitel tepelné roztažnosti	16 · 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>

Tabulka 7.3 – Mechanické vlastnosti oceli 316L (1.4404) [30]

Veličina	Hodnota
Pevnost v tahu R <sub>m</sub>	520 - 680 N/mm <sup>2</sup>
Mez kluzu R <sub>p 0,2min</sub>	220 N/mm <sup>2</sup>
Tažnost A <sub>min</sub>	40%

## 7.2 Měření hustoty

Měření hustoty bylo prováděno na vzorku bez tepelného zpracování (dále jen TZ) a s TZ. Hustota materiálu byla stanovena vážením vzorků na vzduchu (absolutní hmotnost) a ponořením do vody. Objem je dán jako rozdíl mezi těmito hmotnostmi. Jelikož je teplota vody rozdílná, používá se metoda s korekcí vody. Teplota vody při měření byla 23 °C, proto byla její hustota určena na 0,9965 g · cm<sup>-3</sup>. Pro měření byla použita váha Metler Toledo MS204SIMO1 s maximální váživostí do 220 g. Vzorky byly před vážením očištěny a odmaštěny.



Obrázek 7.4 – Váha pro měření hustoty Metler Toledo

Měření hustoty bylo pro oba vzorky provedeno 10x, kvůli správnosti ověření a poté byl spočítán průměr. Přesnost této metody je  $0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  pro rozmezí  $7\text{--}16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Tabulka 7.4 – Měření hustoty

Vzorek 1 (bez TZ)		Vzorek 2 (s TZ)	
Měření	Naměřená hustota [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]	Měření	Naměřená hustota [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
1	7,887	1	7,919
2	7,884	2	7,923
3	7,891	3	7,924
4	7,889	4	7,921
5	7,885	5	7,921
6	7,892	6	7,925
7	7,888	7	7,922
8	7,886	8	7,923
9	7,890	9	7,927
10	7,894	10	7,929
průměr	7,889		7,923

Naměřená hustota u vzorku 1 (bez tepelného zpracování) se oproti udávané hustotě materiálu 316L od výrobce liší o  $0,101 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , tedy asi o 1,26 %. U vzorku 2 (s tepelným zpracováním) se hustota liší o  $0,067 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , to je přibližně o 0,84 %. Výsledné hodnoty se jen nepatrně liší od hodnoty, kterou udává výrobce pro materiál 316L.

### 7.3 Zařízení pro výrobu vzorků

Pro zhotovení vzorků 3D tiskem byl použit stroj Renishaw AM400 a slouží pro stavbu kovových součástí s laserem nataveného kovového prášku. Tato tiskárna patří k nejmodernějším svého druhu, což dokladuje především výsledná kvalita vytisknutých dílů. Mimo materiál 316L nabízí také další certifikované práškové kovy jako jsou např. [31]:

- vysokopevnostní ocel (maraging steel – M300),
- hliníková slitina (AlSi10Mg),
- titanové slitina (Ti6Al4V),

Kvůli bezpečnosti tavení probíhá tisk za neustálého proudění inertního plynu Argon, díky němuž nedochází k oxidaci polotovaru.



Obrázek 7.5 – 3D tiskárna Renishaw AM400

Tabulka 7.5 – Specifikace 3D tiskárny Renishaw AM400

Specifikace	Hodnoty	Jednotka
maximální rozměry součásti (X × Y × Z)	250 × 250 × 300	mm
rychlost výroby (dle materiálu, hustotě, tvaru)	5-20	cm <sup>3</sup> /hod
rychlost snímání	až 2000	mm/s
rychlost polohování	7000	mm/s
tloušťka vrstvy	20-100	μm
výkon laseru	400	W



## 7.4 Svařovací zdroj

Pro svařování zkušebních vzorků byl zvolen svařovací zdroj MagicWave 3000 od firmy Fronius. Tento WIG AC/DC zdroj je zcela digitálně řízený. Disponuje technologií Active Wave, který se vyznačuje maximálně tichým, a přesto vysoce stabilním obloukem. Má výkon až 300 A a disponuje intuitivním ovládáním. Je vhodný pro svařování nízko a vysoce legovaných ocelí, hliníku a jeho slitin. Mimo jiné má také funkce jako bezdotykové zapalování, digitální řízení svařovacího procesu, nebo automatický dofuk plynu (ideální čas dofuku je automaticky vypočítáván tak, aby nedocházelo k oxidaci elektrody a tavné lázně) [32].



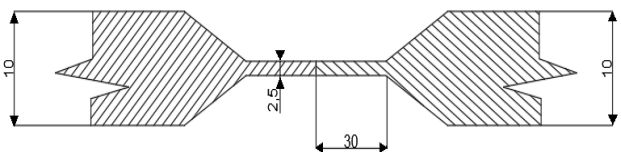
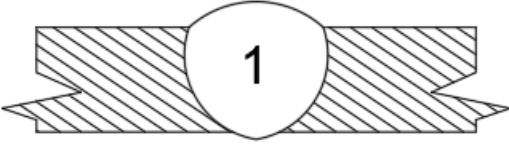
Obrázek 7.6 – Svařovací zdroj MagicWave 3000

## 7.5 Tepelné zpracování

Zkušební vzorky 3D3 a 3D4 byly po výrobě vystaveny tepelnému zpracování žíháním, aby bylo možno posoudit jeho vliv na vlastnosti materiálu, a porovnat s výsledky, které byly dosaženy u vzorků bez tepelného zpracování. TZ bylo provedeno ve vakuové peci Clasic 0816 JAK. V první fázi proběhl ohřev 250 °C za hodinu až na žíhací teplotu 1040 °C. Zkušební vzorky byly vloženy do rozehráté pece na dobu 30 minut. Po vyndání vzorků z pece následovalo zrychlené ochlazování ventilátorem po dobu 30 minut. Na povrchu vzorku s TZ je zřejmá vrstva okují (tzv. opal), která je tvořena oxidy železa, které intenzivně vznikají během ohřevu materiálu za vysokých teplot.

## 8 Návrh pWPS

Tabulka 8.1 – Stanovení postupu svařování výrobce pro vzorky 3D3 a 3D4

Stanovení postupu svařování výrobce (WPS)										
Doklad číslo:						Zkušební orgán:		VŠB		
WPQR číslo:		HRU0165				Zkušební organizace:				
Místo:		Areál VŠB-TU Ostrava				Specifikace základního materiálu dle:				
Výrobce:		VŠB – TU Ostrava				ČSN 42 0002				
Adresa:		17. listopadu 2172/15 708 33 Ostrava-Poruba				ČSN EN 10 027-1				
						ČSN EN 10 027-2		1.4404		
						Další označení				
Metoda svařování:		141				Druh přípravy a čištění:				
Druh svaru:		Tupý				Odmaštění, očištění				
		Heterogenní								
Poloha při svařování:		PA				Tloušťka materiálu:		2,5 mm		
		Vodorovná shora				Vnější průměr:				
Tvar spoje					Postup svařování					
										
Podrobnosti svařování										
Vrstva	Metoda	Průměr přídavných mat. [mm]	Proud		Napětí		Typ proudu/ Polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [mm/s]	Tepelný příkon [kJ/mm]
			[A]		[V]					
			OD	DO	OD	DO				
1	141		80	90	8	13	DC/-		2	0,250
Přídavný materiál					Tepelné zpracování před svařováním					
Klasifikace a výrobní značka:					Metoda:				Rozp. žíhání	
					Rychlost ohřevu:				250°/h	
					Teplota TZ:				1040 °C	
Dle výrobce:					Čas TZ:				30 min	
Dle normy:					Ochlazení:				Vzduchový ventilátor	
Předpis pro sušení: teplota °C/čas					Čas ochlazení:				30 min	
Podmínky svařování					Další informace					
Ochranný plyn:			Argon		Rozkvy (max šíře housenky):					
Průtočné množství plynu:			11 l/min		Rozkvy: amplituda:					
Ochrana kořene:			Argon		Frekvence:					
Průtočné množství plynu:			6 l/min		Čas prodlevy:					
Druh wolframové elektrody/ø			WLa15/2,4 ø		Údaje pro impulzní svařování:					
					Vzdálenost kontaktních dýz:					
Údaje o drážkování/ Podložení kořene			Přípravek na míru		Údaje plazmové svařování:					
					Úhel nastavení hořáku:				90°	
Výrobce:			VŠB – TU Ostrava		Zkušební orgán:			VŠB		

Tabulka 8.2 – Stanovení postupu svařování výrobce pro vzorky 3D1 a 3D2

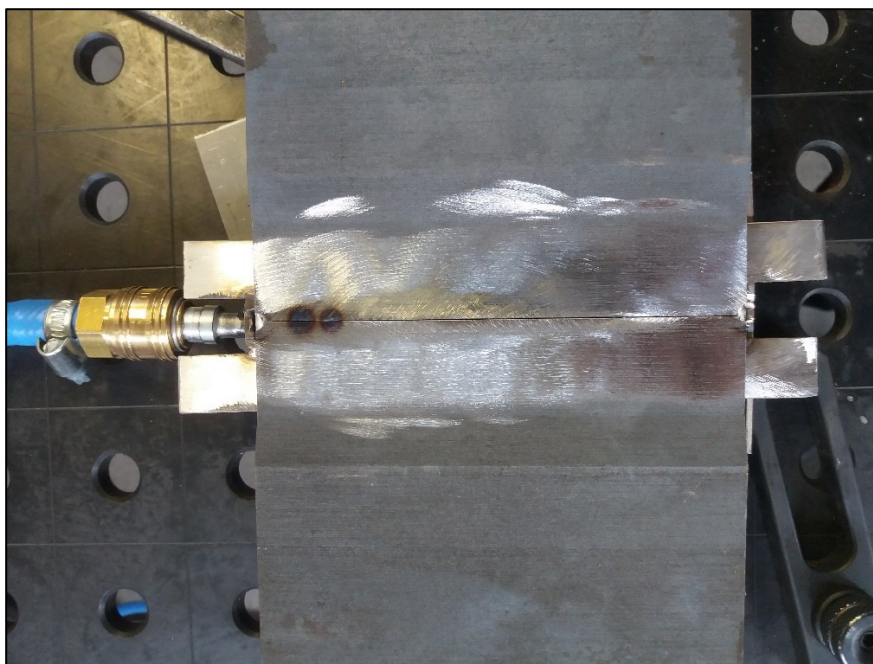
Stanovení postupu svařování výrobce (WPS)										
Doklad číslo:					Zkušební orgán:	VŠB				
WPQR číslo:	HRU0165				Zkušební organizace:					
Místo:	Areál VŠB-TU Ostrava				Specifikace základního materiálu dle:					
Výrobce:	VŠB – TU Ostrava				ČSN 42 0002					
					ČSN EN 10 027-1					
Adresa:	17. listopadu 2172/15 708 33 Ostrava-Poruba				ČSN EN 10 027-2	1.4404				
					Další označení					
Metoda svařování:	141				Druh přípravy a čištění:					
Druh svaru:	Tupý				Odmaštění, očištění					
	Heterogenní									
Poloha při svařování:	PA				Tloušťka materiálu:	2,5 mm				
	Vodorovná shora				Vnější průměr:					
Tvar spoje					Postup svařování					
Podrobnosti svařování										
Vrstva	Metoda	Průměr přídavných mat. [mm]	Proud		Napětí		Typ proudu/ Polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [mm/s]	Tepelný příkon [kJ/mm]
			[A]		[V]					
			OD	DO	OD	DO				
1	141		80	90	8	13	DC/-		2	0,250
Přídavný materiál					Tepelné zpracování před svařováním					
Klasifikace a výrobní značka:					Metoda:					
					Rychlost ohřevu:					
					Teplota TZ:					
Dle výrobce:					Čas TZ:					
Dle normy:					Ochlazení:					
Předpis pro sušení: teplota °C/čas					Čas ochlazení:					
Podmínky svařování					Další informace					
Ochranný plyn:					Rozkvy (max šíře housenky):					
Průtočné množství plynu:					Rozkvy: amplituda:					
Ochrana kořene:					Frekvence:					
Průtočné množství plynu:					Čas prodlevy:					
Druh wolframové elektrody/φ					Údaje pro impulzní svařování:					
					Vzdálenost kontaktních dýz:					
Údaje o drážkování/ Podložení kořene					Údaje plazmové svařování:					
Přípravek na míru					Úhel nastavení hořáku:					
					90°					
Výrobce:					VŠB – TU Ostrava		Zkušební orgán:		VŠB	

## 9 Svařování vzorků

Před samotným svařováním je potřeba, aby svarové plochy byly čisté, bez trhlin, mastnoty a okují. Musí být suché a nesmí na nich dojít ke kondenzaci vody. Svarové plochy u jednotlivých dílů byly před procesem svařování ručně broušeny a odmaštěny.

U tohoto experimentu bylo zvoleno svařování natupo bez úpravy svarových ploch. Pro svařování všech vzorků byla použita metoda 141 (TIG) s použitím wolframové elektrody WLa15 o průměru 2,4 mm, která je vhodná pro svařování stejnosměrným i střídavým proudem. Jelikož se u tohoto experimentu nepoužil přídavný materiál, nebyla mezi jednotlivými díly zvolena žádná mezera pro lepší průvar základního materiálu. Svařování bez mezery se doporučuje do tloušťky 3,2 mm.

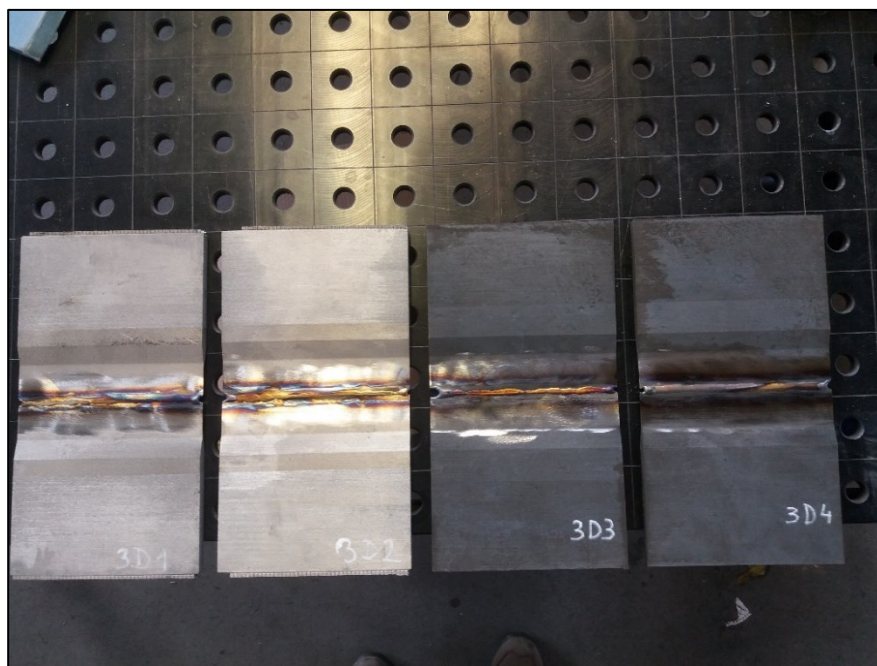
Před samotným svařováním bylo provedeno stehování svarových spojů, viz obrázek 9.1.



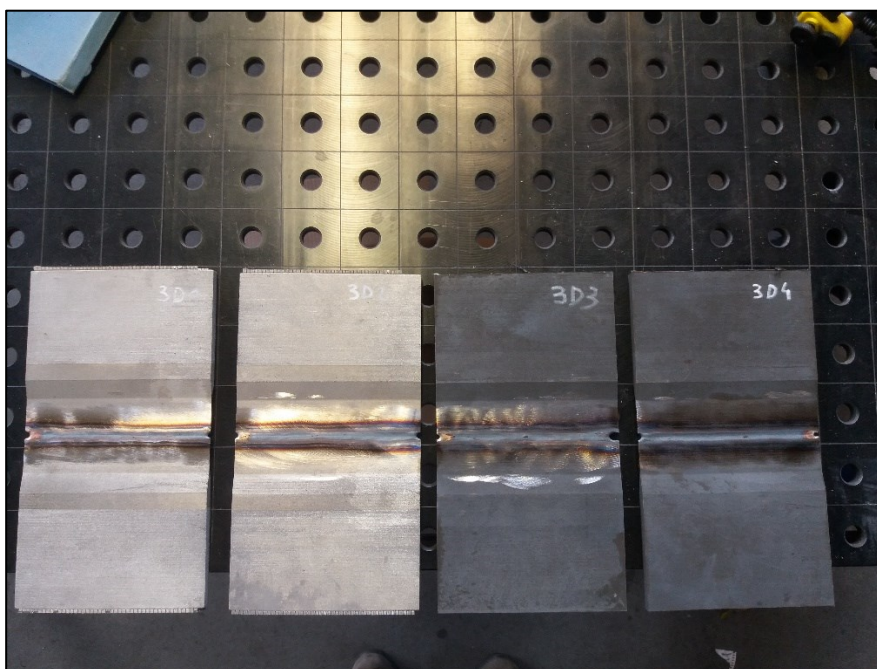
*Obrázek 9.1 – Stehování vzorků*

Pro svařování všech vzorků byl zvolený svařovací proud v rozmezí 80-90 A a svařovací napětí v rozsahu 8-13 V. Pro ochranu svaru a kořene byl použit ochranný plyn argon. Nastavený průtok pro svar byl 11 l/min a pro kořen 6 l/min. Veškeré informace a parametry zhotovených svarových spojů jsou shrnuty v záznamu o svařování, který je umístěn v příloze A.

Postup svařování byl stanoven s ohledem na použité metody a polohy svařování dle kvalifikace pWPS (předchozí kapitola). Svařování provedl odborný svářeč s platným svářečským osvědčením dle ISO 9606-1. Pro svařování byly použity schválené svařovací postupy pro použité materiály, metody a rozsahy dle ISO 15614-1. Tato norma stanovuje způsob kvalifikace předběžné specifikace postupu svařování zkouškami svařování. Definuje podmínky a rozsah kvalifikace pro postupy svařování a pro všechny svářečské operace.



*Obrázek 9.2 – Svařené desky z pohledu kořene*



*Obrázek 9.3 – Svařené desky z vrchního pohledu*

Rychlé změny teplot vyskytující se během svařovacího procesu v okolí svaru způsobuje to, že ve svarovém kovu a základním materiálu probíhají složité metalurgické procesy. Na základě transformačních diagramů je možné určit výslednou strukturu kovu po svařování. Ovšem transformační diagramy neexistují pro všechny materiály. Proto se pro některé materiály určuje přípustné množství přivedené energie při zachování určité svařovací rychlosti, která zaručuje, že docílíme požadované struktury. Výpočet přivedené energie se nachází v následující rovnici:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{v} \cdot 10^{-3} [KJ \cdot mm^{-1}]$$

Kde:

*U* – napětí při svařování [V]

*I* – intenzita svařovacího proudu [A]

*k* – tepelná účinnost (pro TIG se doporučuje 0,6)

*v* – rychlost svařování [*mm* · *s*<sup>-1</sup>]

V této rovnici máme jednu neznámou a tou je rychlost svařování *v*. Rychlost se vypočítá z délky svarového spoje a času svařování:

$$v = \frac{s}{t} [mm \cdot s^{-1}]$$

Kde:

*s* – délka svaru [*mm*]

*t* – svařovací čas [*s*]

Tabulka 9.1 – Důpočet svařovacích parametrů

Označení svaru	Rychlost svařování [ <i>mm</i> · <i>s</i> <sup>-1</sup> ]	Množství přivedeného tepla [ <i>KJ</i> · <i>mm</i> <sup>-1</sup> ]
3D1		
1	2,34	0,240
3D2		
1	2,21	0,254
3D3		
1	2,14	0,262
3D4		
1	1,92	0,292



## 9.1 Pomůcky pro svařování

Pro ochranu kořene byl na míru vyroben přípravek z nerezové oceli viz obrázek níže. Otvorem proudí plyn argon a chrání spodní vrstvu svaru.



*Obrázek 9.4 – Přípravek vyrobený na míru pro zafoukání kořene*

Když svarový kov pronikne kořenem a je u tupého spoje vystaven vzduchu, může dojít k jeho oxidaci. To obvykle neškodí u hliníku a jeho slitin, ale u ocelí (především korozivzdorné oceli) a reaktivních kovů (jako např. titan) může dojít ke zhoršení kvality svaru. Potíží s čistotou kořene svaru lze předejít jeho ochranou formovacím plynem v našem případě argon.

## 10 Zkoušení svarových spojů

Kovy mají své typické vlastnosti, které jsou dány jejich chemickým složením a strukturou. Mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti kovů umožňují jejich uplatnění v technické praxi. Proto je zkoušení kovových materiálů v technické praxi důležitou součástí při výrobním postupu a při kontrole jakosti výrobků. Zkoušení materiálu je také důležitým prostředkem a základem vývojových a výzkumných prací.

U vybraných vzorků byly provedeny destruktivní a nedestruktivní zkoušky pro zjištění jejich kvality a vlastností. Všechny tyto zkoušky proběhly dle příslušných norem. U nedestruktivních zkoušek byla provedena zkouška vizuální, kapilární a prozáření rentgenem. U destruktivních zkoušek proběhly zkoušky tahem, měření tvrdosti a bylo provedeno makroskopické a mikroskopické zhodnocení vzorků.

### 10.1 Vizuální zkouška

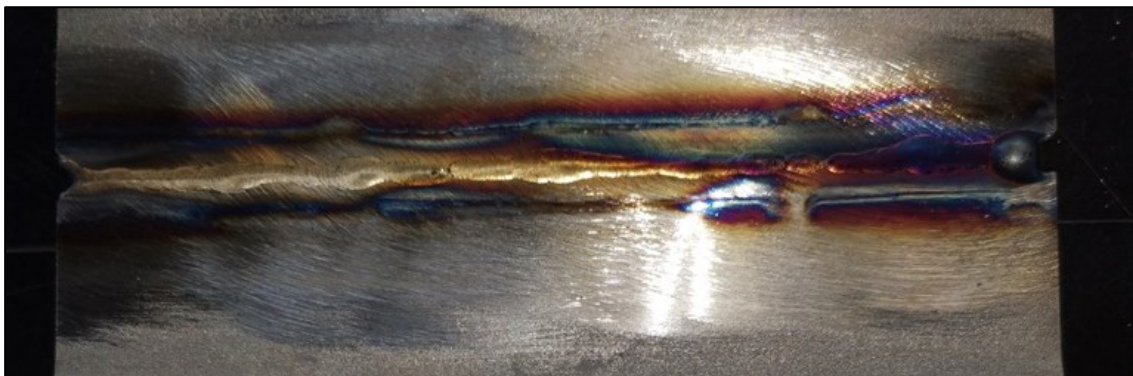
Vizuální zkouškou byly zkontrolovány všechny zhotovené svarové spoje dle normy ČSN EN ISO 5817. Tato norma určuje stupně jakosti podle vad svarových spojů zhotovených tavným svařováním (mimo elektronového a laserového svařování) pro všechny druhy ocelí, niklu, titanu a jejich slitiny. Platí pro tloušťky materiálu větší než 0,5 mm. Norma uvádí tři stupně jakosti, označené B, C a D, aby bylo možné použití normy pro širokou řadu svařovaných výrobků. Stupeň jakosti B odpovídá nejvyššímu požadavku na jakost zhotoveného svaru. Stupně jakosti odpovídají jakosti ve výrobě, a ne vhodnosti použití výrobku. Vlastní provádění VT kontroly je dáno normou ČSN EN ISO 17637.

Vizuální zkouškou bylo zjištěno, že svar u všech vzorků je proláklý (propadlý). Je to dáno tím, že při svařování nebyl použit přídatný materiál. Tím pádem se natavený kov vlivem gravitace mírně propadl. I když nebyly zjištěny žádné jiné povrchové vady, musela být vizuální kontrola kvůli soustavné proláklině vyhodnocena jako nevyhovující. Jelikož se jedná o výzkum vlastností (ne o kvalifikaci svarového spoje) a svařování bez přídatného materiálu byl záměr, byly vzorky puštěny k dalšímu zkoušení.



Obrázek 10.1 – Vzorek 3D1 z detailního pohledu z vrchního pohledu





*Obrázek 10.2 – Vzorek 3D1 z detailního pohledu od kořene*

## **10.2 Kapilární zkouška**

Jako další nedestruktivní zkouška byla provedena kapilární neboli penetrační zkouška. Vady se u této metody projevují vznikem kontrastní barevné indikace (červené na bílém pozadí). Zkouška proběhla dle platné normy ČSN EN ISO 3452-1 Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška – Část 1: Obecné zásady. Vyhodnocení – stupeň přípustnosti se určuje dle ČSN EN ISO 23277.

Vzorky byly před zkoušením očištěny a následně byl nanesen detekční penetrant Pfinder 860. Tento penetrant je červené barvy, snadno umývatelný vodou a jeho minimální doba působení (penetrační doba) je 10 minut. Za tuto dobu se penetrant dostane do všech případných vad, poté se zaschlá kapalina umyla, aby nevytvářela barevné nebo fluoreskující místa, které by měly nepříznivý vliv na indikaci vad. Dalším krokem bylo nanesení vývojky Pfinder 871, která vytvořila bílou vrstvu na povrchu svarového spoje či základního materiálu. Požadavky na zkoušení vlastností specifikuje norma ČSN EN ISO 3452-2 Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení kapilární metodou – Část 2: Zkoušení kapilárních prostředků. V případě našeho zkoušení byl povrch pozorován za denního světla, které osvětluje pracovní plochu rovnoměrně. Dle příslušných norem nebyly zjištěny u všech vzorků žádné indikace a zkouška byla vyhodnocena jako vyhovující.



*Obrázek 10.3 – Vyhodnocení kapilární zkoušky pro vzorek 3D1 (vrchní pohled)*



*Obrázek 10.4 – Vyhodnocení kapilární zkoušky pro vzorek 3D1 (od kořene)*

### **10.3 Zkouška prozářením**

Rentgenové prozáření proběhlo u všech vzorků v akreditované zkušebně. Tato zkouška je vhodná pro zjištění objemových vad, které nebylo možné zjistit předchozími metodami. Zkoušení bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 17636-1 Nedestruktivní zkoušení – Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení – Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film.

Vyhodnocení RT bylo dle normy ČSN EN ISO 10675-1, st. 1 Nedestruktivní zkoušení svarů – Kritéria přípustnosti pro radiografické zkoušení – Část 1: Ocel, nikl, titan a jejich slitiny. Na základě této zkoušky byly zjištěny některé vady. U vzorku 3D1 byla zjištěna vada Fb (nepravidelný povrch) a u vzorku 3D3 se vyskytla vada s označením Aa (pór). U ostatních vzorků nebyly zjištěny žádné vady. Typy vad jsou normovány dle EN ISO 650-1. Zkouška byla vyhodnocena jako vyhovující pro všechny vzorky. Veškeré parametry a informace k této zkoušce jsou uvedeny protokolu o zkoušce, který je umístěn v příloze B.

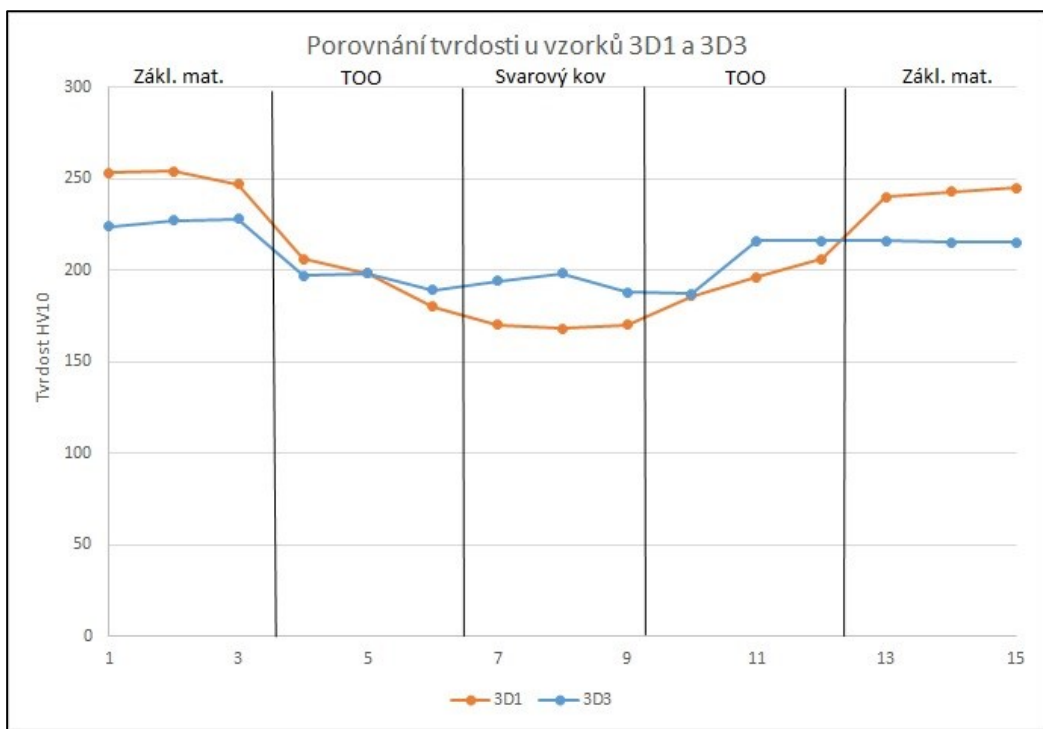
### **10.4 Měření tvrdosti**

Na vzorcích 3D1 a 3D3 vytištěných pomocí 3D tiskárny byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse. Zkouška byla zhotovena dle normy ČSN ISO 6507-1. Tato metoda spočívá ve vnikání diamantového intendoru do zkušebního tělesa při zatížení působícím ve směru kolmém k povrchu. Tvrdost podle Vickerse se označuje symbolem HV. Vybrané vzorky byly před měřením naleptány a vybroušeny (příprava vzorků je rozebrána v následující kapitole). Následně byly zality do válců z pryskyřice. Měření tvrdosti proběhlo na tvrdoměru WPM Liepzig 300/436 se zatěžováním HV10 (10 kg). Toto zařízení má diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Hodnota tvrdosti se určuje z poměru zátěžné síly a plochy vtisku. Z naměřených hodnot byl vytvořen graf, viz obrázek 10.6.



Obrázek 10.5 – Tvrdoměr WPM Leipzig 300/436

Na obou vzorcích bylo provedeno celkem 19 vpichů přes celé pásmo (od zákl. materiálu až po svarový kov) v jedné linii. Vzdálenost mezi vpichy je 0,5 mm. Byly udělaný i další kontrolní vpichy v TOO, které se vyskytovaly pod i nad linií měření.



Obrázek 10.6 – Porovnání tvrdosti vzorků 3D1 a 3D3

Z grafu je zřejmé že vzorek, který prošel procesem TZ (3D3) má v oblasti základního materiálu nižší tvrdost. Je to dáno tím, že rozpouštěcí žíhání rozpouští karbidy a vzniká nová homogenní struktura., která se projevuje právě menší tvrdostí materiálu. Naopak ve svarovém kovu má vzorek 3D3 větší tvrdost a v TOO jsou pak tvrdosti obou vzorků přibližně stejné.

## 10.5 Tahová zkouška

Zkoušky tahem byly provedeny zkušební akreditovanou laboratoří VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o. v Ostravě. Celkem bylo uskutečněno 14 měření ze kterých byly vyhotoveny protokoly, které jsou uvedeny v příloze C. Zkoušení se skládalo z tahové zkoušky svarového spoje a základního materiálu (v příčném i podélném směru) pro vzorek 3D2 bez tepelného zpracování a pro vzorek 3D4 s tepelným zpracováním. Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách. Všechny grafy těchto zkoušek jsou uvedeny v příloze D. Získaná data lze porovnat také s mechanickými vlastnostmi uváděnými výrobcem materiálu, které jsou prezentovány v tabulce 7.3.

Tabulka 10.1 – Výsledky zkoušky tahem svarového spoje pro oba vzorky

Umístění vzorku: svarový spoj				
Číslo vzorku	Zatížení na mezi kluzu [kN]	Mez kluzu R p0,2 [Mpa]	Mez pevnosti Rm [Mpa]	Místo lomu
	Max. zatížení [kN]			
3D2				
1/1	11,4	380	577	ve svaru
	17,3			
1/2	10,4	357	580	ve svaru
	16,9			
1/3	10,2	340	553	ve svaru
	16,6			
3D4				
1/1	8,74	322	545	ve svaru
	14,8			
1/2	9,49	324	543	mimo svar
	15,9			
1/3	8,91	336	562	ve svaru
	14,9			

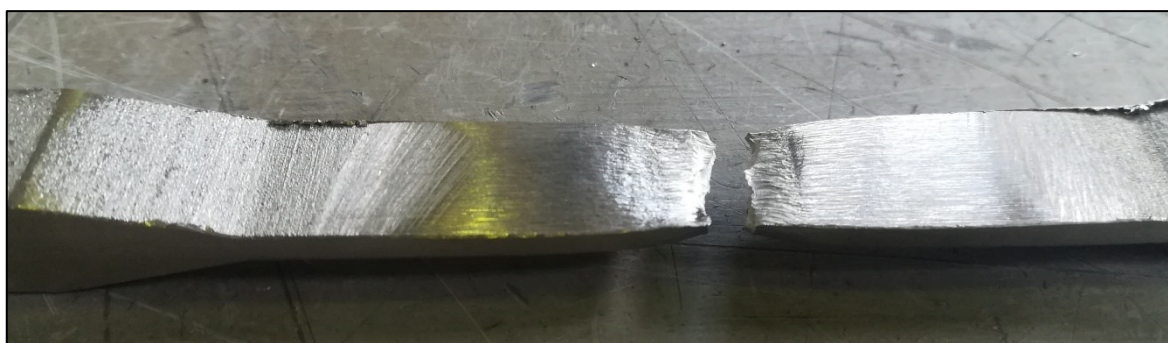
Dle uvedených výsledků vykazují vzorky 3D4 mírný pokles u hodnot meze kluzu, než je u vzorků 3D2. Je to dáno tepelným zpracováním, které vede ke zvýšení houževnatosti materiálu (došlo tak k jeho odpevnění), čemuž odpovídají nižší hodnoty meze kluzu. Všechny vzorky pro svarový spoj vyhovují hodnotám, které uvádí výrobce. U vzorku 3D4 1/2 došlo k lomu mimo svarový spoj, to může být zapříčiněno vnitřní vadou v základním materiálu.



Na následujících snímcích jsou zobrazeny některé vzorky pro zkoušku tahem svarového spoje. Jedná se o vzorky 3D2 1/3 a 3D4 1/1, 1/2.



Obrázek 10.7 – Snímky tahové zkoušky některých vzorků pro svarový spoj



Obrázek 10.8 – Detailní pohled na místo lomu u vzorku 3D2 1/3



Obrázek 10.9 – Detailní pohled na místo lomu u vzorku 3D4 1/2

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty tahových zkoušek základního materiálu v podélném směru. Výsledné hodnoty vyhovují hodnotám, které uvádí výrobce. Tažnost u vzorku s tepelným zpracováním 3D4 je přibližně o 10% větší. Jak již bylo zmíněno výše, souvisí to s nižšími hodnotami meze kluzu.

Tabulka 10.2 – Výsledky tahové zkoušky obou vzorků základního materiálu v podélném směru

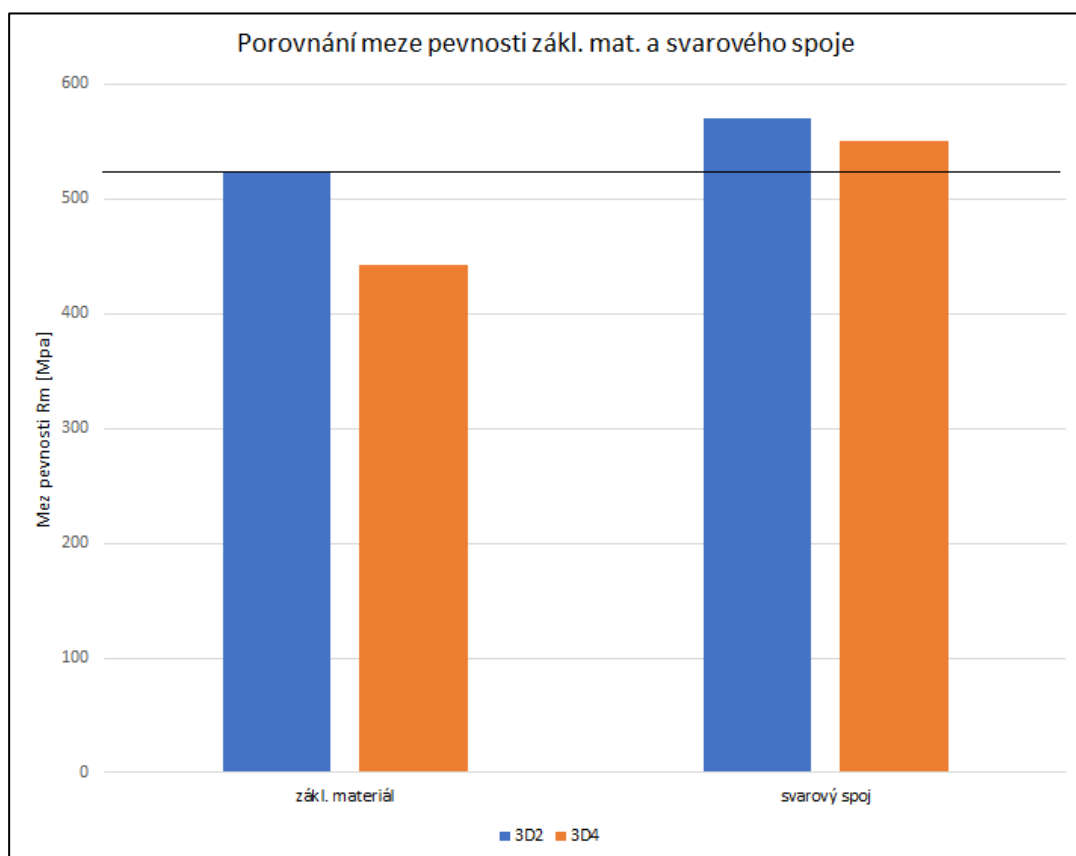
Umístění vzorku: základní materiál v podélném směru					
Číslo vzorku	Zatížení na mezi kluzu [kN]	Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	Mez pevnosti R <sub>m</sub> [Mpa]	Tažnost A5 [%]	Kontrakce Z [%]
	Max. zatížení [kN]				
3D2					
2/1	11,1	554	674	30,8	43,4
	13,5				
2/2	11,1	552	666	29,2	40,6
	13,4				
3D4					
2/1	8,23	414	654	38,4	51,6
	13				
2/2	8,18	407	642	40	49,4
	12,9				

Následující tabulka zobrazuje výsledky tahové zkoušky základního materiálu v příčném směru. Jako v předchozích případech jsou hodnoty meze kluzu nižší u vzorku s tepelným zpracováním. Z hodnot tažnosti došlo v příčném směru k významným změnám z pohledu deformace materiálu. Celková deformace vzorků v příčném směru dosáhla mnohonásobně nižších hodnot než v případě vzorků v podélném směru, a to především díky úzké oblasti plastické deformace. Tažnost je v podstatě trvalá deformace (prodloužení) měrné délky. Dle hodnot maximálního zatížení lze vypožorovat, že pro přetržení zkušební tělesa v příčném směru, byly vzorky zatíženy menší silou. Co se týče meze pevnosti, došlo v příčném směru k poklesu hodnot u obou vzorků.

Tabulka 10.3 – Výsledky tahové zkoušky obou vzorků základního materiálu v příčném směru

Umístění vzorku: základní materiál v příčném směru					
Číslo vzorku	Zatížení na mezi kluzu [kN]	Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [Mpa]	Mez pevnosti R <sub>m</sub> [Mpa]	Tažnost A5 [%]	Kontrakce Z [%]
	Max. zatížení [kN]				
3D2					
3/1	8,7	434	480	3,2	9,7
	9,62				
3/2	9,39	469	569	11,2	20,6
	11,4				
3D4					
3/1	7,6	384	503	8,4	16
	9,96				
3/2	7,23	361	381	2,8	5,9
	7,63				

U vzorku 3D4 3/2 byla naměřená malá mez pevnosti. Takto malá hodnota znamená, že během měření došlo k předčasnému lomu. Došlo k tomu nejspíš v důsledku vnitřní vady v základním materiálu.



Obrázek 10.10 – Porovnání meze pevnosti základního materiálu a svarového spoje

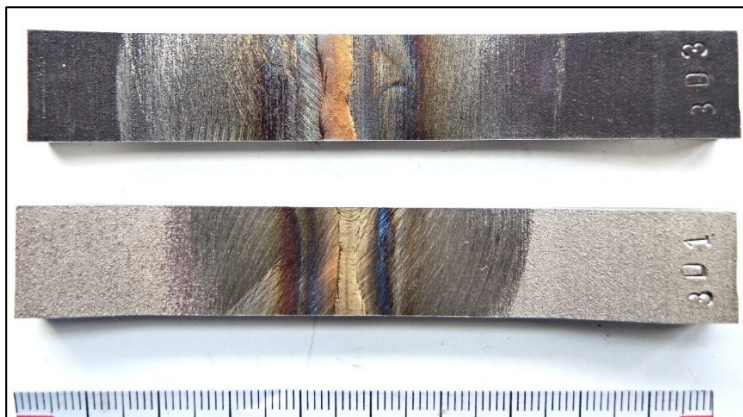
Hodnoty v grafu jsou zprůměrované výsledky všech měření, kterých se tento graf týká. Z grafu lze odečíst, že mez pevnosti obou vzorků je větší ve svarovém spoji než v základním materiálu. Mez pevnosti je nejnižší v základním materiálu u vzorku 3D4 (tato hodnota je trochu zkreslená hodnotou měření u vzorku 3D4 3/2, jelikož došlo k předčasnému lomu) a je to dáno procesem tepelného zpracování kterým vzorek prošel. U svarového spoje je mez pevnosti vzorku 3D4 větší než u vzorku 3D2 v základním materiálu.

## 10.6 Makrostruktura a mikrostruktura svarového spoje

Metalografické zkoušení je metoda sledování struktury nebo vad materiálu, které jsou pozorovatelné pouze tehdy, pokud dodržíme jednotlivé kroky pro přípravu vzorků. Během přípravy nesmí dojít k ovlivnění struktury (plastické deformace nebo vysokou teplotou, která vede k fázovým transformacím). Nejvíce se používá u této zkoušky optická mikroskopie. Pozorováním vzorků můžeme získat poměrné zastoupení metalurgických fází, zjišťovat výskyt porozity materiálu nebo vyhodnocovat měření tvrdosti a mikrotvrdosti. Pro metalografické zkoušení byly použity vzorky 3D1 a 3D3.

### 10.6.1 Příprava metalografických vzorků

Prvním krokem v přípravě vzorků bylo jejich rozřezání ve zkoumané oblasti svarového spoje. Tento proces oddělení byl proveden řezáním za mokra, aby v materiálu nedošlo k výraznému zvýšení teploty vlivem tření a tím k fázovým přeměnám.



Obrázek 10.11 – Vzorky 3D1 a 3D3 pro metalurgické pozorování

Po rozřezání částí vzorků byla provedená následující preparace, a to zalití vzorků do tablet. To usnadňuje přípravu během procesu broušení a leštění. Jako zalévací médium byla použita pryskyřice ve formě sypkého prášku s názvem Conanfat. Zalisování za tepla probíhalo při teplotě 180 °C při tlaku vysokém 50 kN po dobu 15-18 minut. Pro zalisování vzorků byl použit přístroj ProntoPress-20.



Obrázek 10.12 – Přístroj pro lisování za tepla ProntoPress-20

Po této operaci byly vzorky připraveny pro broušení a leštění povrchu. Musí být dosaženo dokonalého povrchu bez viditelných rýh. Toho se docílilo postupným úběrem materiálu.



K tomuto účelu byla použita poloautomatická bruska TegraForce-5. Vzorky, které byly připraveny ve tvaru tablety, umožňují snadné upnutí do držáku brusky. Pro broušení byla použita metoda C s brusným kotoučem Piano 220. Tento proces broušení trval minutu a půl. Vzorek rotoval v držáku ve směru otáčení brusného kotouče, který se pohyboval rychlostí 30-150 ot./min. Kvůli těmto vysokým otáčkám bylo zapotřebí chladit brusný kotouč vodou, aby nedošlo ke změně struktury a ovlivnění výsledků.



*Obrázek 10.13 – Poloautomatická bruska TegraForce-5*

Po procesu broušení následovala fáze leštění. Při tomto procesu nedocházelo k úběru materiálu (zanedbatelné množství), ale pouze k deformaci povrchové vrstvy. Tento proces je podobný jako broušení jen s tím rozdílem, že místo brousícího kotouče byla umístěna speciální leštící podložka s naneseným brusivem. Držák se vzorkem se otáčel proti směru otáčení leštící podložky. Tím bylo dosaženo zrcadlového lesku na povrchu vzorku.

Pro pozorování mikrostruktury bylo nutné vzorek naleptat. Leptání bylo provedeno v 4 % kyselině šťavelové za podmínek 6 V a 1-2 A/cm<sup>2</sup>. Proces leptání probíhal za použití stejnosměrného proudu, kdy anodou byl vzorek a katodou nerezová nádoba. Takto se vytvořil požadovaný povrchový reliéf a vzorek byl poté připraven k pozorování pod mikroskopem viz obrázek 10.14.



*Obrázek 10.14 – Mikroskop Olympus GX51*



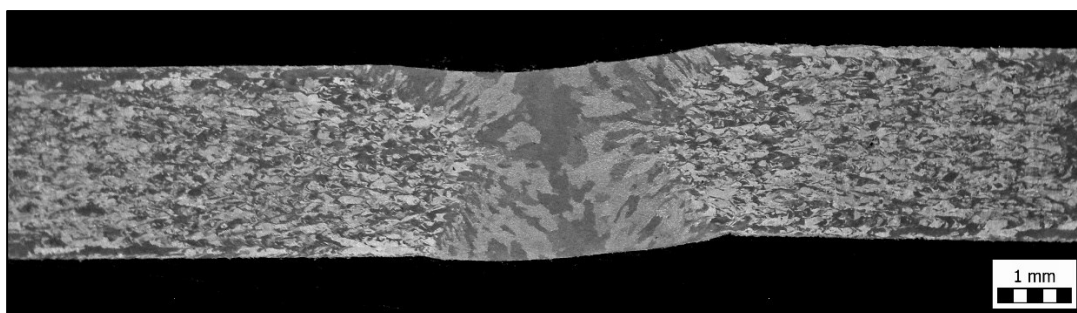
*Obrázek 10.15 – Hotové vzorky po zalisování použité pro pozorování*

### **10.6.2 Makrostruktura svarového spoje**

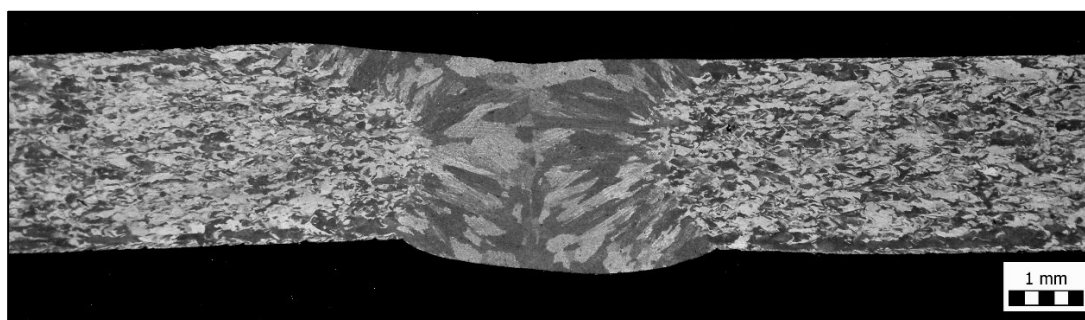
Makroskopické pozorování svarového spoje umožňuje především hodnocení výskytu vad. Pro pozorování vzorků byl použit stereomikroskop Olympus SZX7. Makroskopické snímky byly pořízeny ze vzorku bez tepelného zpracování 3D1, tak i ze vzorku 3D3, který prošel procesem tepelného zpracování.



*Obrázek 10.16 – Stereomikroskop Olympus SZX7*



*Obrázek 10.17 – Makroskopický snímek vzorku 3D1*



*Obrázek 10.18 – Makroskopický snímek vzorku 3D3*

Na obrázku 10.17 a 10.18 je vidět makrostruktura svarového spoje. Oba svary jsou dobře provedeny a nejsou na nich patrné žádné vady. U vzorku 3D3 můžeme vidět mírně propadlý kořen, to je dáno tím, že se svařovalo bez přídavného materiálu (pouze protavením základního materiálu) a vlivem gravitace, jak už bylo zmíněno v kapitole 10.2 vizuální zkouška. Dále pak u tohoto vzorku je patrná částečná rekrystalizace materiálu.

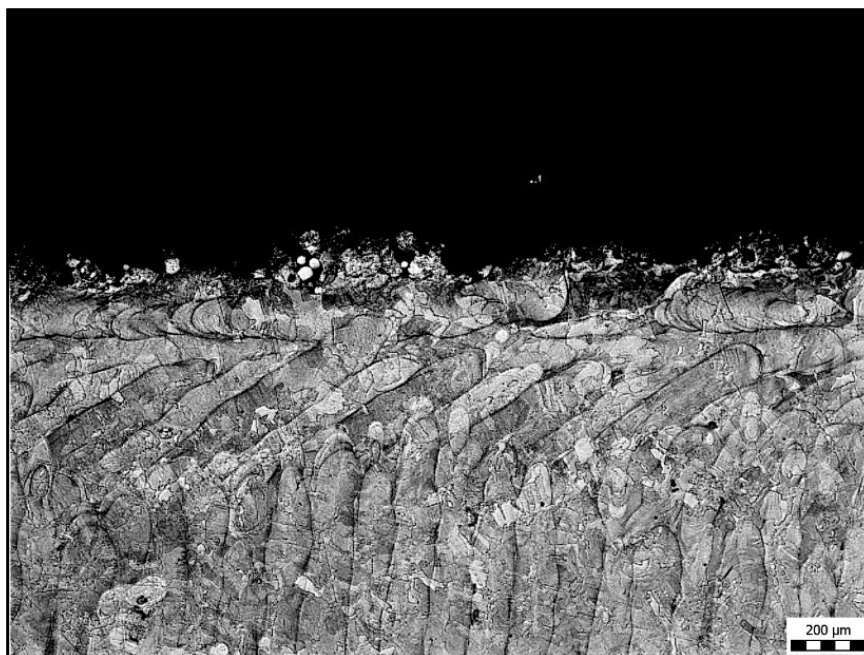
### 10.6.3 Mikrostruktura vzorku bez tepelného zpracování (3D1)

Na následujícím obrázku 10.19, který byl pořízen na mikroskopu se zvětšením 200x, můžeme pozorovat detailnější pohled na mikrostrukturu 3D tisku pro vzorek 3D1. V příčném řezu vzorku jsou jasně viditelné tavné lázně (charakteristická struktura 3D tisku), které jsou různě prorostlé austenitickými zrny. Velikost jednotlivých vrstev, které se tvoří postupným natavováním, je průměrně 50  $\mu\text{m}$ . Na snímku jsou podél hranic zrn patrné karbidy.



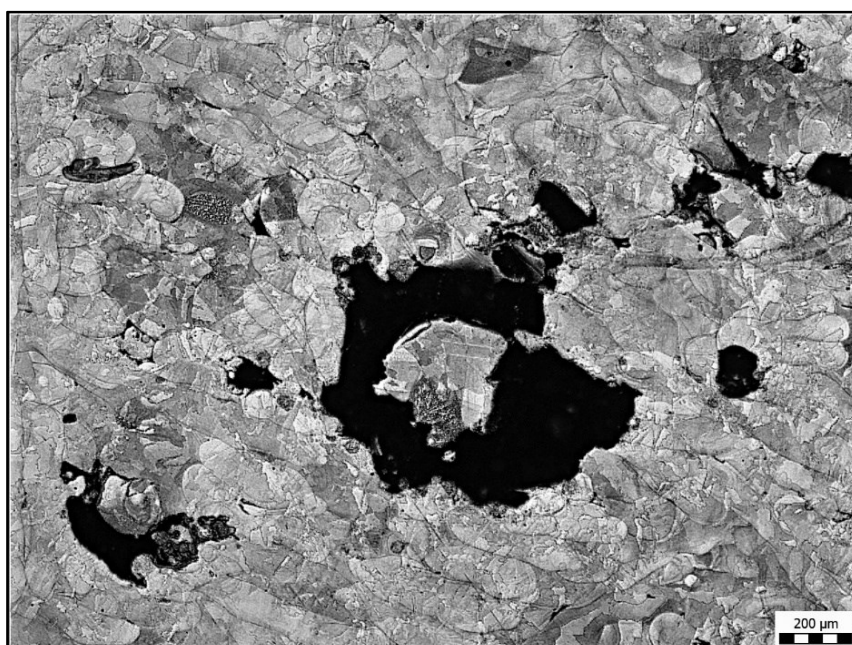
Obrázek 10.19 – Charakteristická struktura 3D tisku 200x zvětšeno (příčný řez)

Mikrostruktura základního materiálu s nanášenými vrstvami v podélném řezu vzorku se nachází na obrázku 10.20. Ve struktuře jsou jasně patrné tavné pásy, které tam zanechal laserový paprsek při výrobě. Na tomto snímku lze vidět nedokonalost povrchu materiálu. Na povrchu součásti dochází k ulpívání částečně roztaveného prášku. Dochází k němu, když laser nataví pouze část zrna, které se spojí s okolním materiálem. Na obrázku lze pozorovat i rozstřík taveniny, který také vede ke zhoršení jakosti povrchu.



*Obrázek 10.20 – Mikrostruktura základního materiálu v podélném řezu zvětšená 50x*

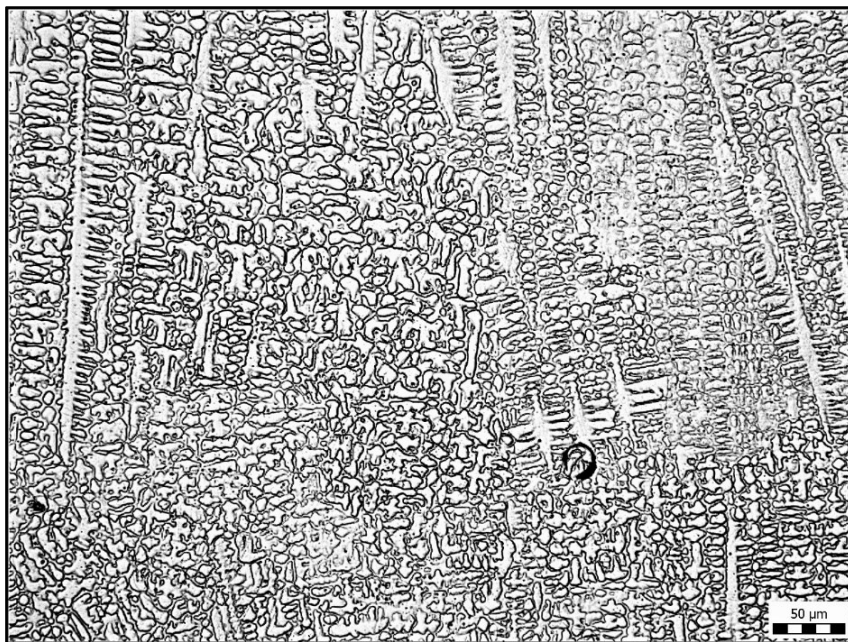
Během zkoumání byla v materiálu vzorku 3D1 odhalena vada, kterou lze vidět na následujícím snímku. Jedná se o část neroztaveného prášku v základním materiálu, kolem kterého vznikla dutina. Původem takové vady většinou bývá nedostatečné natavení částic práškového kovu. Velikost vady mohla být ovlivněna procesními parametry. Tyto vady lze považovat za běžně se vyskytující jev v mikrostruktuře materiálu zpracovaného 3D tiskem.



*Obrázek 10.21 – Vada objevená v podélném řezu u vzorku 3D1*

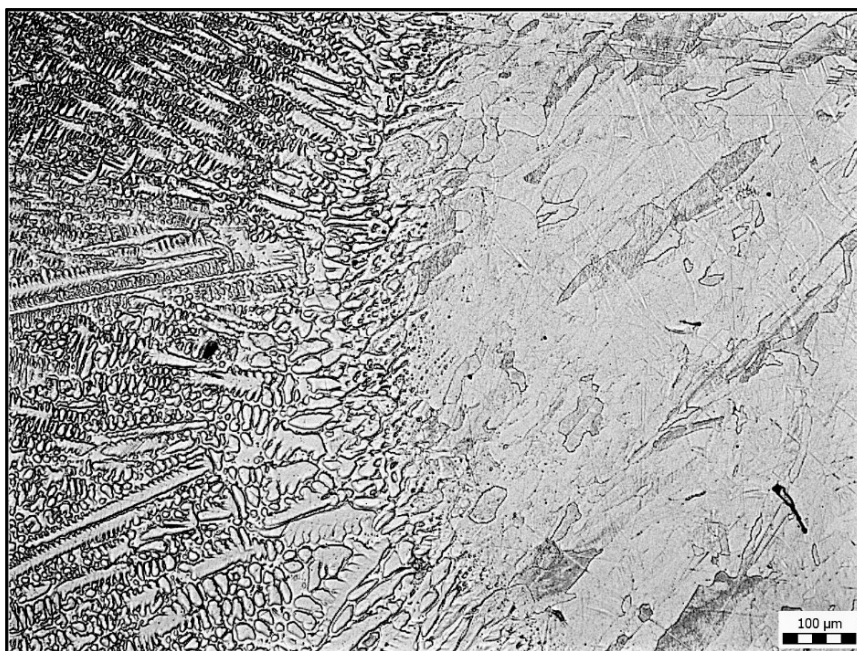
Na dalším obrázku je znázorněna licí struktura svarového kovu. V této struktuře pozorujeme austenit a delta ferit, který je vyloučen mezidendriticky, jedná se tedy o dendritickou strukturu.





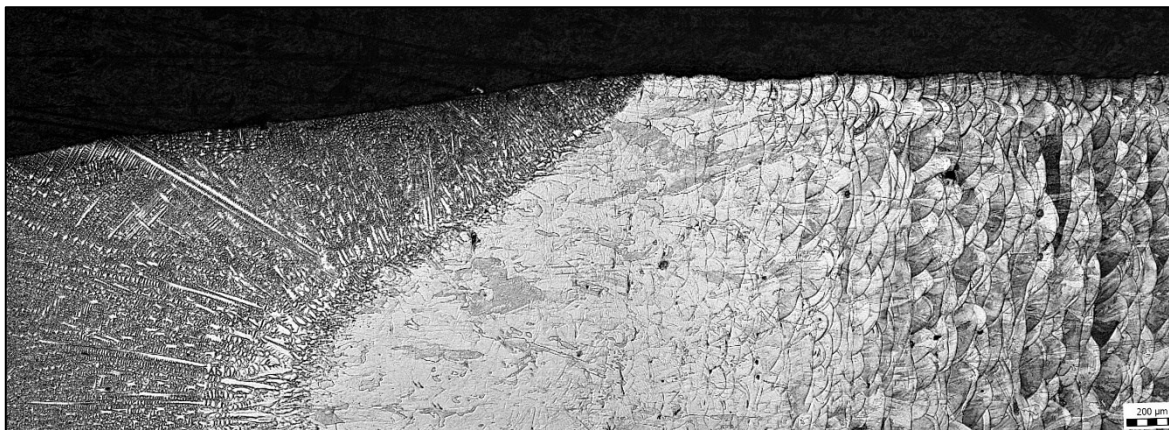
*Obrázek 10.22 – Mikrostruktura svarového kovu zvětšená 200x*

Na snímku 10.23 je zobrazen přechod mezi svarovým kovem a základním materiálem. Struktura v TOO se z charakteristické struktury 3D tisku změnila téměř do homogenní austenitické struktury s patrným výskytem karbidů a pórů. Tato změna je dána vysokou teplotou při svařovacím procesu, kdy dochází k rozpouštění karbidů a rekrytalizaci.



*Obrázek 10.23 – Přechod mezi zákl. materiálem a svarovým kovem v příčném řezu zvětšeno 100x*

Následující panoramatický mikroskopický snímek ukazuje, jak počáteční 3D textura v TOO zaniká směrem k hranici ztavení až po svarový kov.



*Obrázek 10.24 – Panoramatický snímek vzorku 3D1 v příčném řezu zvětšený 50x*

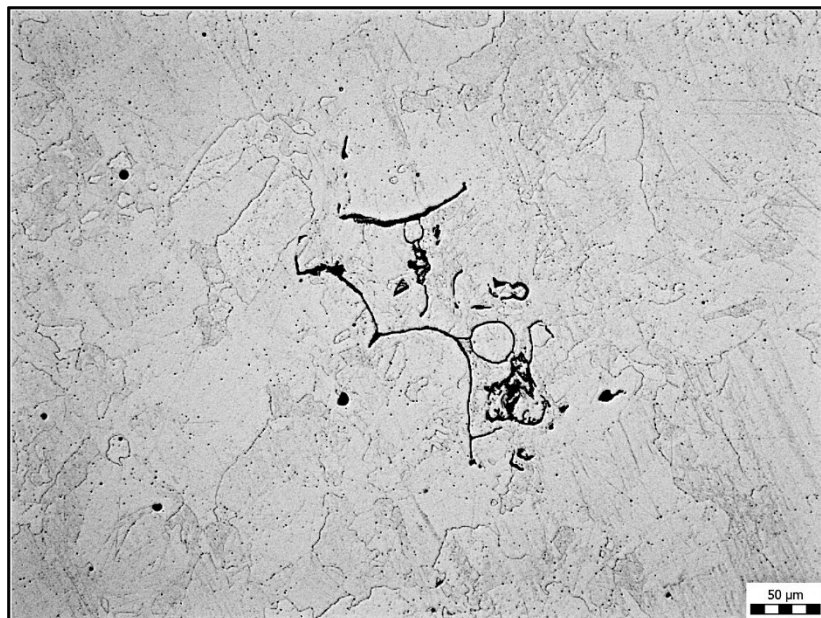
#### **10.6.4 Mikrostruktura vzorku s tepelným zpracováním (3D3)**

Na obrázku 10.25 můžeme vidět vliv tepelného zpracování při teplotě 1040 °C, které způsobilo rozpuštění tavných lázní jasně zřetelných na snímcích u vzorků bez TZ z předešlé kapitoly. U materiálu došlo k rekrytalizaci a částečnému rozpuštění karbidů. Vlivem krátkého působení TZ (30 minut) nedošlo k úplnému rozpuštění karbidů a jejich výskyt tak můžeme pozorovat na zaniklých hranicích tavných lázní. U tohoto vzorku nejsou viditelné žádné charakteristické znaky 3D tisku. Mikrostruktura je tvořena čistě austenitickými zrny.



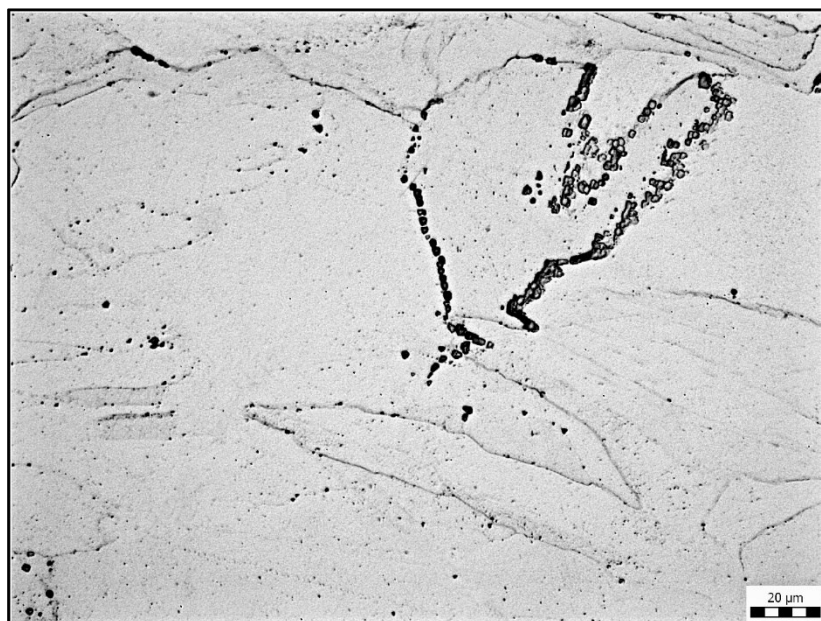
*Obrázek 10.25 – Mikrostruktura vzorku, základní materiál po TZ, zvětšeno 200x*

Při zkoumání mikrostruktury byl v materiálu vzorku 3D3 objeven zajímavý defekt. Na obrázku níže jsou zachyceny póry nepravidelného tvaru a trhliny. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, tyto vady vznikají při výrobě, kdy laser nedostatečně nataví kovový prášek. Takové vady se můžou vyskytovat v celém objemu materiálu.



*Obrázek 10.26 – Vada ve vzorku 3D3*

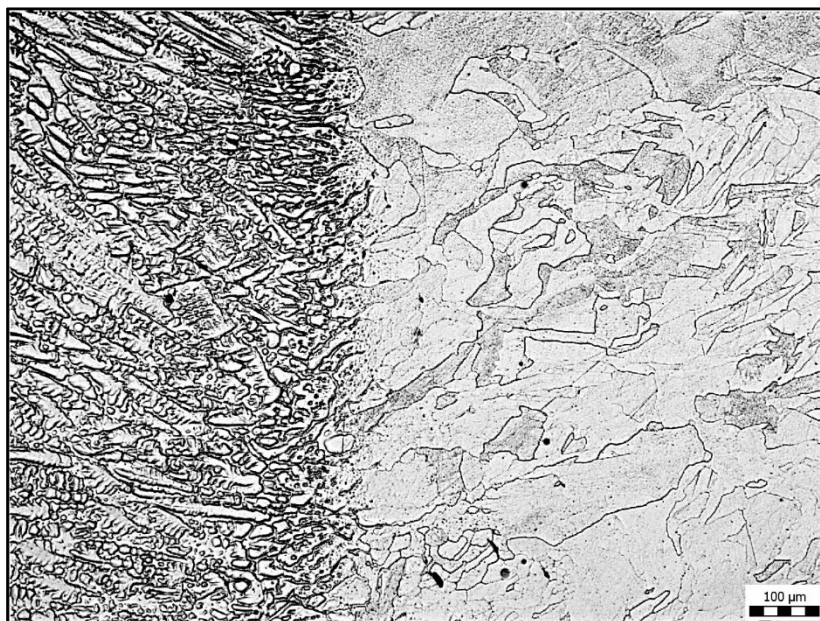
Na obrázku 10.27 jsou na hranici zrna patrné karbidy, které se při tepelném zpracování nerozpustily.



*Obrázek 10.27 – Vyloučené karbidy na hranici zrna*

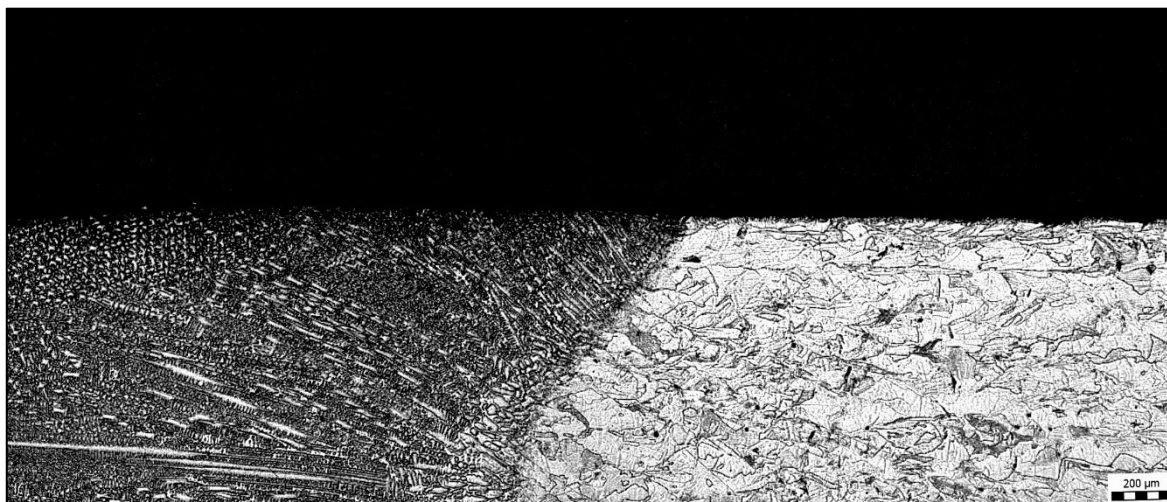


Na následujícím snímku vidíme hranici ztavení. Mikrostruktura TOO u vzorku s TZ je shodná se základním materiálem a shodná i s TOO u vzorku bez TZ. Svarový kov má stejnou homogenní strukturu jako předchozí vzorek 3D1.



*Obrázek 10.28 – Přejít mezi zákl. materiálem a svarovým kovem v příčném řezu zvětšeno 100x*

U tohoto panoramatického snímku u vzorku s TZ je jasně vidět, jak se změnila celá struktura zákl. materiálu. Dříve charakteristická struktura 3D tisku úplně zmizela vlivem TZ.



*Obrázek 10.29 – Panoramatiký snímek vzorku 3D3 v příčném řezu zvětšený 50x*

## Závěr

Diplomová práce je zaměřena na zkoumání vlivu svařovací technologie na vlastnosti a mikrostrukturu svarového spoje na výrobku zhotoveného pomocí 3D tisku.

V teoretické části této diplomové práce byl objasněn pojem aditivní výroba a její všeobecné rozdělení se zaměřením na tisk kovových materiálů. Dále byla rozebrána technologie 3D tisku SLM a technologie svařování TIG. Následně byly popsány nedestruktivní a destruktivní zkoušky, které byly provedeny na vyrobených kusech.

Praktická část práce se soustředí na vlastnosti oceli EN 1.4404, resp. 316L ze které byly vyrobeny 3D tiskem zkušební desky. Některé vzorky byly tepelně zpracovány a poté svařeny. Na takto zhotovených kusech proběhly nejdříve nedestruktivní zkoušky a následně se udělaly zkoušky destruktivní. Všechny dosažené výsledky byly zpracovány a vyhodnoceny.

Vzhledem k poměrně vysoké ceně a náročnosti výroby 3D tiskem se experiment omezil na nezbytně nutný počet vzorků, jejichž rozměry byly zvoleny tak, aby na nich mohly proběhnout všechny potřebné zkoušky. Pro výzkumné účely této práce bylo vyrobeno celkem 8 zkušebních desek technologií 3D tisku SLM. Čtyři z těchto desek byly podrobeny tepelnému zpracování v peci s ochrannou atmosférou argonu při teplotě 1040 °C po dobu 30 minut. Po vytažení z pece následovalo chlazení ventilátorem po dobu 30 minut.

Pro svařování desek byl zvlášť sestaven postup specifikace svarového spoje (pWPS) pro desky s tepelným zpracováním a bez TZ, kde byly zvoleny vhodné parametry pro svařování metodou TIG. V rámci experimentu probíhalo svařování bez přídavného materiálu tzn. pouhým ztavením základního materiálu. Pro ochranu kořene byl použit speciální přípravek, vyrobený „na míru“.

Na všech zhotovených svarových spojkách byly následně provedeny nedestruktivní zkoušky. Nejdříve se provedla vizuální zkouška. Touto zkouškou bylo odhaleno mírné propadnutí svarového spoje, které je dáno tím, že záměrně nebyl použit přídavný materiál. U všech vzorků poté následovala penetrační zkouška. Zkouška proběhla a byla vyhodnocena dle příslušných norem a byla vyhodnocena jako vyhovující. Poté byly vzorky odeslány do akreditované zkušebny, kde byla provedena zkouška prozářením. Zkouška byla vyhodnocena pro všechny vzorky jako vyhovující.

Poté byly vzorky vystaveny destruktivnímu zkoušení. Byla provedena zkouška makrostruktury a mikrostruktury. Makroskopická zkouška neodhalila žádné patrné vady. Mikrostrukturní analýza odhalila značnou odlišnost materiálu vzorků. U vzorku 3D1 je vidět charakteristická struktura 3D tisku v podobě „tavných lázní“, zatímco u vzorku 3D3 proběhla vlivem tepelného zpracování částečná rekrytalizace a struktura se změnila na čistě austenitickou. Avšak u tohoto vzorku neproběhlo úplné rozpuštění karbidů. Je to dáno příliš krátkou dobou, po kterou byl vzorek vystaven tepelnému zpracování. Proto bych navrhoval dobu setrvání v peci alespoň na jednu hodinu. Na panoramatickém snímku vzorku bez tepelného zpracování byl pozorován plynulý přechod ze základního materiálu až po svarový kov. Původní 3D struktura základního materiálu směrem ke svarovému kovu postupně zaniká. Struktura svarového kovu pro oba vzorky je homogenní a pozorujeme v ní austenit a delta ferit, který je vyloučen mezidendriticky, jedná se tedy o dendritickou strukturu.

Tahová zkouška byla provedena akreditovanou zkušebnou. Zkoušky se prováděly pro svarový spoj, tak i pro základní materiál v příčném a podélném směru. U vzorků, kde se testoval svarový spoj proběhlo přetržení u jednoho vzorku mimo svarový spoj, všechny ostatní vzorky byly přetrženy ve svaru. Hodnoty meze pevnosti u vzorků pro svarový spoj odpovídají hodnotám, které uvádí výrobce. V podélném směru prokázaly všechny testované vzorky vyhovující hodnoty. U vzorků s tepelným zpracováním jsou naměřené hodnoty meze kluzu menší přibližně o 150 MPa. Je to dáno tepelným zpracováním, které vede ke zvýšení houževnatosti materiálu (došlo tak k jeho odpevnění), čemuž odpovídají nižší hodnoty meze kluzu. V příčném směru u základního materiálu jsou u obou vzorků patrné nižší hodnoty jak u meze kluzu, tak u meze pevnosti oproti hodnotám naměřeným ve směru podélném. Z hodnot tažnosti došlo v příčném směru k významným změnám. Celková deformace vzorků v příčném směru dosáhla mnohonásobně nižších hodnot než v případě vzorků v podélném směru. U jednoho ze vzorků testovaného v příčném řezu došlo k předčasnému lomu. Důvodem mohla být přítomnost vnitřní vady. Na základě vytvořeného grafu porovnání meze pevnosti svarového spoje a základního materiálu, pro oba vzorky vyplývá, že mez pevnosti obou vzorků je větší ve svarovém spoji než v základním materiálu.

Korozivzdorná ocel 316L připravena 3D tiskem se i přes své specifické odlišnosti může v mnoha případech rovnat konvenčně zhotovenému materiálu téže jakosti. Dle provedených tahových zkoušek, je potřeba velmi důsledně dbát na směr namáhání materiálu vůči kladeným vrstvám výsledného produktu. Problémem jsou taky vady, které vznikají ve struktuře při aditivní výrobě. Z nabytých poznatků vyplývá, že proces aditivní výroby je zatížen mnoha proměnnými, které se v případě konvenční výroby neuplatňují. Je

třeba vzít v úvahu i časovou a finanční náročnost výroby. Přesto lze 3D tisk kovů považovat za velice perspektivní technologii, která bude v blízké budoucnosti nacházet čím dál větší uplatnění.

### **Poděkování**

V závěru bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu v řešeném projektu v rámci diplomové práce doc. Ing. Petru Mohylovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracování práce a za jeho cenné rady a připomínky, které mi velmi pomohly.

Dále bych chtěl poděkovat Vysoké škole báňské, která finančně podpořila mou práci.

## Citovaná literatura

- [1] Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM) – Konstrukter.cz. Konstrukter.cz – CAD/CAM, 3D tisk a konstruování výrobků [online]. Copyright © 2019 [cit. 03.03.2020]. Dostupné z: [https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/?fbclid=IwAR2iyfn2ulSX-grJyFUM-EdYQZGqp8QP4imqQAKuTrvC\\_P7u9F1Ee9yy08](https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/?fbclid=IwAR2iyfn2ulSX-grJyFUM-EdYQZGqp8QP4imqQAKuTrvC_P7u9F1Ee9yy08)
- [2] Zetková, Ivana. Disertační práce – Problematika výroby malých strojních kovových součástí 3D tiskem. Plzeň: ZČU, 2017. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/28412>
- [3] 3D tisk kovů DMLS SLM | Technologie 3D tisku a materiály. Redirecting to <https://www.materialise.com/en> [online]. Copyright © Copyright Materialise [cit. 05.03.2020]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>
- [4] Selective Laser Melting (SLM) – 3D Printing Simply Explained | All3DP. All3DP | World's #1 3D Printing Magazine [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>
- [5] SLM (Selective Laser Melting) | cotu.cz. 3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz [online]. Copyright © 2020 [cit. 06.03.2020]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/118/slm-selective-laser-melting>
- [6] DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing | Element. Materials and Product Testing, Inspection & Certification | Element [online]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>
- [7] DULEBA, Branislav. Materials and finishing methods of DMLS manufactured parts [online]. Copyright©oM[cit.06.03.2020].Dostupnéz: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/21-2011/pdf/143-148.pdf>
- [8] STRANO, Giovanni, Liang HAO, Richard M. EVERSON a Kenneth E. EVANS. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2013, 213(4), 589-597 [cit. 2020-03-7]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013612003366>
- [9] CALIGNANO, F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. Materials & Design [online]. 2014, 64, 203-213 [cit. 2020-03-8]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.07.043. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914005755>
- [10] LOSERTO VÁ, Monika. Technologie speciálních slitin [online]. Copyright ©n [cit. 10.03.2020]. Dostupné z: [https://www.fmml.vsb.cz/export/sites/fmml/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/technologie-specialnich-slitin/Losertova\\_Technologie\\_specialnich\\_slitin.pdf](https://www.fmml.vsb.cz/export/sites/fmml/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/technologie-specialnich-slitin/Losertova_Technologie_specialnich_slitin.pdf)

- [11] WANG, Di, Shibiao WU, Fan FU, Shuzhen MAI, Yongqiang YANG, Yang LIU a Changhui SONG. Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties. *Materials & Design* [online]. 2017, 117, 121-130 [cit. 2020-03-11]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.060. ISSN 02641275. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516315866>
- [12] WANG, Di, Yongqiang YANG, Ziheng YI a Xubin SU. Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, 65(9-12), 1471-1484 [cit. 2020-03-11]. DOI: 10.1007/s00170-012-4271-4. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4271-4>
- [13] LU, Yanjin, Songquan WU, Yiliang GAN, Tingting HUANG, Chuanguang YANG, Lin JUNJIE a Jinxin LIN. Study on the microstructure, mechanical property and residual stress of SLM Inconel-718 alloy manufactured by differing island scanning strategy. *Optics & Laser Technology* [online]. 2015, 75, 197-206 [cit. 2020-03-11]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.07.009. ISSN 00303992. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399215002108>
- [14] PARRY, L., I.A. ASHCROFT a R.D. WILDMAN. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermomechanical simulation. *Additive Manufacturing* [online]. 2016, 12, 1-15 [cit. 2020-03-11]. DOI: 10.1016/j.addma.2016.05.014. ISSN 22148604. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860416300987>
- [15] Materialise Takes the Pain Out of Support Generation for Metal 3D Printing - Digital Engineering 24/7. *Digital Engineering 24/7 - Optimal Technology for Engineering Design, Simulation, Prototyping, Testing and Computing* [online]. Copyright © Copyright 2020, Peerless Media, LLC. All Rights Reserved. [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://www.digitalengineering247.com/article/materialise-takes-the-pain-out-of-support-generation-for-metal-3d-printing>
- [16] BALEJ Z., KUDĚLKA V., OPLETAL J. Základní kurz svařování metodou 141 se souborem testových otázek. 2. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2009. 160 s. ISBN 80-866698-12-2, 2009
- [17] Co je metoda TIG? Základní seznámení | SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ. SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ - profesionální e-shop se svařovací technikou [online]. Dostupné z: <https://www.svaracky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
- [18] TIG svařování I - základní principy. [online]. [cit. 12.03.2020]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702>
- [19] TIG svařování II – AC nebo DC. [online]. [cit. 12.03.2020]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008122801>
- [20] Wolframové elektrody pro TIG svařování. [online]. [cit. 13.03.2020]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006111201>
- [21] ČSN EN ISO 15614-1 Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové svařování a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu. 2017. ICS 25.160.10.
- [22] Ústav strojírenské technologie, ČVUT v Praze [online]. Copyright © [cit. 14.04.2020]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/104/def-kontrola-sv.pdf>

[23] Střední průmyslová škola Ostrava – Vítkovice, příspěvková organizace - Úvod [online]. Copyright©[cit.14.04.2020].Dostupné: [https://www.spszengrova.cz/texty/texty/KOM/KOM\\_3\\_5\\_SPU-zkousky\\_bez\\_poruseni\\_materialu.pdf](https://www.spszengrova.cz/texty/texty/KOM/KOM_3_5_SPU-zkousky_bez_poruseni_materialu.pdf)

[24] [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_014/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF%2003.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_014/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF%2003.pdf)

[25] O KATEDŘE | KMT TU Liberec [online]. Copyright © [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/kestaz/KMT\\_NMI\\_NM-P\\_PR04\\_CZE\\_Odehnalova\\_Zkouseni%20materialovych%20vlastnosti%20I.pdf](http://www.kmt.tul.cz/kestaz/KMT_NMI_NM-P_PR04_CZE_Odehnalova_Zkouseni%20materialovych%20vlastnosti%20I.pdf)

[26] Documents Professional Platform - PDF Download Free - ADOC.TIPS [online]. Dostupné z: <https://adoc.tips/queue/111-zkouka-tahem-provadi-se-na-zkuebni-tyi-prez-kruhovy-nebo.html>

[27] Problematika hodnocení svarových spojů. Časopis KONSTRUKCE – informace o uplatnění konstrukcí a návazných oborů při stavbách ve stavebnictví a strojírenství [online]. Copyright©Copyright2002[cit.15.04.2020]Dostupné: <http://old.konstrukce.cz/clanek/pr oblematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>

[28] Italinox. Italinox [online]. [cit. 04.05.2020]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/>

[29] Data sheets – Additive manufacturing. Object moved [online]. Copyright © [cit. 13.05.2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/data-sheets-additive-manufacturing--17862>

[30] NEREZOVÁ OCEL 1.4404 - INOX, spol. s r. o.. Prodej nerezového hutního materiálu - trubek, jablek, tyčí, plechů, příslušenství - INOX, spol. s r. o. [online]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>

[31] 3D tisk kovů | Protolab.cz. Protolab - 3D tisk plastů a kovů, 3D skenování, podpora malých podniků [online]. Copyright © [cit. 07.05.2020]. Dostupné z: <https://protolab.cz/3d-tisk-kovovych-slitin/>

[32] SVAŘOVACÍ ZDROJE | MagicWave 3000 | FROWELD – profesionální svařovací, řezací a nabíjecí technika. FROWELD – profesionální svařovací, řezací a nabíjecí technika [online]. Copyright © FROWELD [cit. 07.05.2020]. Dostupné z: <http://www.froweld.cz/svarovaci-technika/eshop/2-1-SVAROVACI-ZDROJE/0/5/1217-MagicWave-3000//description#anch1>

[33] KEMPEN, K., THIJS, L., YASA, E., BADROSSAMAY, M a KRUTH, J-P. (2011). Process Optimization and Microstructural Analysis for Selective Laser Melting of AlSi10Mg. 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011.

[34] CWS ANB – česká svářečská společnost [online]. Copyright © [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=479>



## Seznam obrázků

Obrázek 2.1 – Schéma technologie SLM [33] .....	13
Obrázek 2.2 – Schodovitý efekt [11] .....	14
Obrázek 2.3 – Zhoršení povrchu u převislých ploch [9] .....	15
Obrázek 2.4 – Rozstřík taveniny [11].....	15
Obrázek 2.5 – princip deformace [12].....	16
Obrázek 2.6 – Trhlina zapříčiněná velkým vnitřním napětím [14].....	16
Obrázek 2.7 – Příklad podpurné struktury [15] .....	17
Obrázek 3.1 – Princip svařování metodou TIG [17] .....	18
Obrázek 3.2 – Strmá statická V-A charakteristika TIG svářečky [19] .....	19
Obrázek 3.3 – a) přímá polarita, b) nepřímá polarita, c) střídavá polarita [19] .....	20
Obrázek 3.4 – Ukázka některých wolframových elektrod pro TIG svařování [20] .....	23
Obrázek 3.5 – Vztah délky špičky k průměru elektrody [20] .....	23
Obrázek 3.6 – Podélné broušení elektrody [20] .....	24
Obrázek 3.7 – Vliv směru broušení špičky [20] .....	24
Obrázek 3.8 – Vliv excentricity špičky na svařování metodou TIG [20] .....	25
Obrázek 3.9 – Vliv geometrie špičky na svařování metodou TIG [20] .....	25
Obrázek 4.1 – Zkušební kus pro tupý spoj na plechu s plným průvarem [21] .....	29
Obrázek 6.1 – Přepočet vztahů pro tahovou zkoušku [25] .....	33
Obrázek 6.2 – a) zkušební tyč pro trubky, b) zkušební tyč pro plechy [25].....	34
Obrázek 7.1 – Zkušební desky vyrobené 3D tiskem.....	36
Obrázek 7.2 – Schéma výrobku.....	36
Obrázek 7.3 – Nesvařené vyrobené desky .....	37
Obrázek 7.4 – Váha pro měření hustoty Metler Toledo .....	39
Obrázek 7.5 – 3D tiskárna Renishaw AM400.....	40
Obrázek 7.6 – Svařovací zdroj MagicWave 3000 .....	41
Obrázek 9.1 – Stehování vzorků.....	44
Obrázek 9.2 – Svařené desky z pohledu kořene .....	45
Obrázek 9.3 – Svařené desky z vrchního pohledu .....	45
Obrázek 9.4 – Přípravek vyrobený na míru pro zafoukání kořene .....	47
Obrázek 10.1 – Vzorek 3D1 z detailního pohledu z vrchního pohledu .....	48
Obrázek 10.2 – Vzorek 3D1 z detailního pohledu od kořene .....	49
Obrázek 10.3 – Vyhodnocení kapilární zkoušky pro vzorek 3D1 (vrchní pohled) .....	49
Obrázek 10.4 – Vyhodnocení kapilární zkoušky pro vzorek 3D1 (od kořene).....	50
Obrázek 10.5 – Tvrdoměr WPM Leipzig 300/436 .....	51
Obrázek 10.6 – Porovnání tvrdosti vzorků 3D1 a 3D3 .....	51
Obrázek 10.7 – Snímky tahové zkoušky některých vzorků pro svarový spoj .....	53

Obrázek 10.8 – Detailní pohled na místo lomu u vzorku 3D2 1/3 .....	53
Obrázek 10.9 – Detailní pohled na místo lomu u vzorku 3D4 1/2 .....	53
Obrázek 10.10 – Porovnání meze pevnosti základního materiálu a svarového spoje .....	55
Obrázek 10.11 – Vzorky 3D1 a 3D3 pro metalurgické pozorování .....	56
Obrázek 10.12 – Pístroj pro lisování za tepla ProntoPress-20 .....	56
Obrázek 10.13 – Poloautomatická bruska TegraForce-5 .....	57
Obrázek 10.14 – Mikroskop Olympus GX51 .....	58
Obrázek 10.15 – Hotové vzorky po zalisování použité pro pozorování .....	58
Obrázek 10.16 – Stereomikroskop Olympus SZX7 .....	59
Obrázek 10.17 – Makroskopický snímek vzorku 3D1.....	59
Obrázek 10.18 – Makroskopický snímek vzorku 3D3.....	59
Obrázek 10.19 – Charakteristická struktura 3D tisku 200x zvětšeno (příčný řez) .....	60
Obrázek 10.20 – Mikrostruktura základního materiálu v podélném řezu zvětšená 50x ....	61
Obrázek 10.21 – Vada objevená v podélném řezu u vzorku 3D1 .....	61
Obrázek 10.22 – Mikrostruktura svarového kovu zvětšená 200x .....	62
Obrázek 10.23 – Přejchod mezi zákl. materiálem a svarovým kovem v příčném řezu zvětšeno 100x .....	62
Obrázek 10.24 – Panoramatický snímek vzorku 3D1 v příčném řezu zvětšený 50x .....	63
Obrázek 10.25 – Mikrostruktura vzorku, základní materiál po TZ, zvětšeno 200x .....	63
Obrázek 10.26 – Vada ve vzorku 3D3.....	64
Obrázek 10.27 – Vyloučené karbidy na hranici zrna .....	64
Obrázek 10.28 – Přejchod mezi zákl. materiálem a svarovým kovem v příčném řezu zvětšeno 100x .....	65
Obrázek 10.29 – Panoramatický snímek vzorku 3D3 v příčném řezu zvětšený 50x .....	65

## Seznam tabulek

Tabulka 3.1 – Přiřazení barev jednotlivým typům elektrod [20] .....	21
Tabulka 3.2 – Proudová zatížitelnost wolframových elektrod [20] .....	26
Tabulka 4.1 – Kontrola a zkoušení zkušebních kusů [21] .....	30
Tabulka 6.1 – Maximální přípustné hodnoty tvrdosti (HV 10) [21] .....	35
Tabulka 7.1 – Chemické složení materiálu 316L (1.4404) [29] .....	38
Tabulka 7.2 – Fyzikální vlastnosti oceli 316L (1.4404) [29] .....	38
Tabulka 7.3 – Mechanické vlastnosti oceli 316L (1.4404) [30] .....	38
Tabulka 7.4 – Měření hustoty .....	39
Tabulka 7.5 – Specifikace 3D tiskárny Renishaw AM400 .....	40
Tabulka 8.1 – Stanovení postupu svařování výrobce pro vzorky 3D3 a 3D4 .....	42
Tabulka 8.2 – Stanovení postupu svařování výrobce pro vzorky 3D1 a 3D2 .....	43
Tabulka 9.1 – Dopočet svařovacích parametrů .....	46
Tabulka 10.1 – Výsledky zkoušky tahem svarového spoje pro oba vzorky .....	52
Tabulka 10.2 – Výsledky tahové zkoušky obou vzorků základního materiálu v podélném směru .....	54
Tabulka 10.3 – Výsledky tahové zkoušky obou vzorků základního materiálu v příčném směru .....	54

## Seznam příloh

Příloha A	Záznam o svařování
Příloha B	Protokol zkoušky prozářením
Příloha C	Protokoly tahových zkoušek
Příloha D	Grafy tahových zkoušek
Příloha E	Výrobní výkres